N. Condacse

# LOCOMOTIVE ŞI TRENURI ELECTRICE

EDITURA DIDACTICĂ ŞI PEDAGOGICĂ
BUCUREŞTI — 1980

MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI ÎNVĂȚĂMÎNTULUI

*Prof. dr. ing.* NICU CONDACSE

# LOCOMOTIVE ȘI TRENURI ELECTRICE

Editura didactică și pedagogică
București — 1980

*Referent ştiinţific: prof. dr. ing.* AUREL NEGREANU

*Redactor: ing.* **Irina Trif**
*Tehnoredactor:* **Victoria Ghimiş**
*Grafician:* **Nicolae Sîrbu**

## Introducere

*În cadrul economiei noastre naționale transporturile ocupă un loc deosebit de important. De buna organizare și funcționare a transporturilor depind aprovizionarea cu materii prime și materiale a tuturor unităților economice, satisfacerea operativă și îndestulătoare a populației cu mărfuri de consum, asigurarea circulației ireproșabile a cetățenilor. Orice întîrziere sau dereglare în sistemul de transport are puternice repercusiuni asupra întregului angrenaj al vieții sociale.*

*Dezvoltarea și modernizarea transporturilor în țara noastră a reprezentat și reprezintă o preocupare constantă a conducerii de partid și de stat. Această preocupare s-a reflectat în prevederile cuprinse în planurile de dezvoltare economico-socială a țării și rezultatele obținute sînt cunoscute.*

*În cooperare cu celelalte sisteme de transport (rutier, naval, aero), cooperare prin care se valorifică avantajele specifice fiecăruia din aceste sisteme, căile ferate aduc o contribuție însemnată la satisfacerea necesităților de transport și rămîn ca sistem de bază în cadrul național (volum de transport, viteză, siguranță).*

*Începînd cu anul 1959 s-a trecut la dieselizarea tracțiunii pe căile ferate, iar din 1965 la electrificarea lor. Atît locomotivele diesel cît și cele electrice se produc în țară, parte din producție fiind exportată.*

*În ultimul timp s-a pus un accent și mai mare pe electrificarea căilor ferate și implicit pe producția de locomotive electrice, fapt care permite o folosire mai rațională a resurselor energetice. În momentul de față toate magistralele rețelei C.F.R. sînt electrificate și dispunem de un parc de cîteva sute de locomotive electrice.*

*Referindu-se la rolul și perspectiva căilor ferate în sistemul național de transport, secretarul general al partidului, tovarășul Nicolae Ceaușescu arăta:*

*„Calea ferată va constitui în continuare principalul mijloc de transport, asigurîndu-se dotarea ei cu locomotive și vagoane de mare capacitate, dublarea și electrificarea liniilor cu trafic intens"*.*

---

* Raportul Comitetului Central cu privire la activitatea Partidului Comunist Român în perioada dintre Congresul al XI-lea și Congresul al XII-lea și sarcinile de viitor ale partidului.

*Extinderea tracțiunii electrice conduce la o însemnată economie de combustibili superiori și la creșterea eficienței economice prin micșorarea cheltuielilor de exploatare.*

*În acest sens la Căile ferate române s-a urmărit cu consecvență o politică tehnică rațională concretizată în următoarele etape:*

*1 — dotarea parcului cu locomotive Co-Co puternice pentru satisfacerea în principal a traficului de marfă pe liniile grele de munte;*

*2 — înzestrarea parcului cu locomotive Bo-Bo pentru satisfacerea în principal a traficului de călători și a traficului de marfă pe liniile cu profil ușor;*

*3 — introducerea trenurilor electrice automotor (TEA) pentru satisfacerea traficului suburban de călători.*

*Lucrarea* Locomotive și trenuri electrice, *prin conținut și modul de tratare, se adresează studenților din învățământul superior tehnic, Facultatea de transporturi. Într-o largă măsură se adresează și inginerilor din specialitatea Tracțiune electrică și Material rulant de cale ferată.*

*Modul de sistematizare al materialului pune la îndemîna studenților materialul de primă necesitate pentru realizarea lucrărilor de laborator și proiectelor de an.*

*Autorul își exprimă speranța că prin sugestiile ce le va primi lucrarea va fi îmbunătățită prin valorificarea mai bună a experienței colegilor din cercetare, a studenților și inginerilor antrenați în realizarea programelor de dezvoltare ale sistemului de transport din țara noastră.*

AUTORUL

# Cuprins


CAPITOLUL 1 — **PROBLEME GENERALE PRIVIND TRACȚIUNEA ELECTRICĂ ȘI LOCOMOTIVELE ELECTRICE**

**1.1. Instalațiile principale ale unei căi ferate electrice** . . . . . 11
**1.2. Sisteme de tracțiune electrică feroviară** . . . . . 12
1.2.1. Sistemul curentului trifazat . . . . . 13
1.2.2. Sistemul curentului continuu . . . . . 14
1.2.3. Sistemul curentului monofazat de joasă frecvență 16 2/3 Hz. și tensiune 15 kV. . . . . 18
1.2.4. Sistemul curentului monofazat de frecvență industrială (50 Hz) și tensiune 25 kV . . . . . 21
**1.3. Definiții, clasificări și subansamble componente ale locomotivelor electrice.** 23
**1.4. Notarea simbolică a locomotivelor electrice** . . . . . 26
**1.5. Scurt istoric privind tracțiunea electrică** . . . . . 27
**1.6. Generalități privind partea electrică a locomotivelor electrice** . . . . . 28

CAPITOLUL 2 — **LOCOMOTIVA ELECTRICĂ DE CURENT CONTINUU**

**2.1. Locomotive electrice de curent continuu clasice** . . . . . 30
**2.2. Locomotive electrice de curent continuu și înaltă tensiune** . . . . . 30
**2.3. Circuitul principal de forță** . . . . . 31
**2.4. Motorul electric de tracțiune** . . . . . 34
2.4.1. Condiții de funcționare, gabarit și montaj, impuse de exploatare . . 34
2.4.2. Tipuri de motoare de curent continuu . . . . . 35
2.4.3. Ecuațiile generale ale motorului serie. . . . . 36
2.4.4. Parametrii principali de definire a unui motor de tracțiune . . . . . 37
2.4.5. Limitele de încălzire pentru motoarele de tracțiune de pe vehiculele electrice . . . . . 38
2.4.6. Caracteristicile funcționale ale motorului serie . . . . . 40
2.4.7. Caracteristicile funcționale ale motorului derivație . . . . . 44
2.4.8. Caracteristicile electromecanice universale ale motoarelor de tracțiune de curent continuu. . . . . 45
2.4.9. Funcționarea motorului de tracțiune în condiții impuse de exploatare și raționea alegerii motorului tip serie . . . . . 45
2.4.10. Stabilitatea electrică în funcționare a motorului serie . . . . . 50
2.4.11. Stabilitatea mecanică în funcționare a motorului serie . . . . . 52
2.4.12. Mărimi caracteristice motoarelor serie de tracțiune . . . . . 53

**2.5. Reglarea vitezei** . . . . . 54
2.5.1. Necesitatea reglării vitezei și metode de reglare . . . . . 54
2.5.2. Reglarea vitezei prin variația tensiunii la bornele motorului de tracțiune . . . . . 55

2.5.3. Reglarea vitezei prin variația fluxului inductor . . . . . 60
2.5.4. Reglarea reostatică . . . . . 68
2.5.5. Ansamblul caracteristicilor de tracțiune . . . . . 69
2.5.6. Deformarea caracteristicii de tracțiune după diverși parametri . . . 70

**2.6. Demarajul și reglarea** . . . . . 73
2.6.1. Generalități și condiții . . . . . 73
2.6.2. Metoda grafo-analitică pentru calculul reostatului . . . . . 76
2.6.3. Metoda analitică pentru calculul reostatului . . . . . 80
2.6.4. Exemplu de calcul. . . . . 81
2.6.5. Eliminarea treptelor de rezistență în perioada de demaraj . . . . 86
2.6.6. Construcția reostatului . . . . . 87
2.6.7. Consumul de energie în reostatul de pornire în perioada de demaraj 87

**2.7. Serviciile auxiliare** . . . . . 88
2.7.1. Schema electrică a circuitelor serviciilor auxiliare . . . . . 89
2.7.2. Grupul moto-ventilatoare . . . . . 89
2.7.3. Grupul moto-compresor . . . . . 91
2.7.4. Grupul convertizor de tensiune . . . . . 92
2.7.5. Circuitele de încălzire electrică a vagoanelor de călători și a locomotivei . . . . . 92

**2.8. Intoarcerea curentului de tracțiune** 93

**2.9. Aparataj și protecții de bază** . . . . . 94
2.9.1. Captatorul de curent (pantograf) . . . . . 95
2.9.2. Butoane de comandă . . . . . 109
2.9.3. Relee . . . . . 110
2.9.4. Protecția la supratensiuni . . . . . 112
2.9.5. Protecția locomotivei la suprasarcini și scurtcircuite . . . . . 114
2.9.6. Protecția diferențială contra punerilor accidentale la masă . . . . 116
2.9.7. Protecția la tensiune minimă . . . . . 116
2.9.8. Contactoare . . . . . 116
2.9.9. Inversor de mers . . . . . 118

**2.10. Circuite de comandă** . . . . . 120

**2.11. Frînarea electrică** . . . . . 121
2.11.1. Generalități . . . . . 121
2.11.2. Frînarea electrică reostatică folosind generatorul serie . . . . . 124
2.11.3. Calculul reostatului de frînare . . . . . 131
2.11.4. Frînarea reostatică folosind generator cu excitație separată . . . 132
2.11.5. Frînarea recuperativă . . . . . 133

CAPITOLUL 3 – **LOCOMOTIVA ELECTRICĂ DE CURENT ALTERNATIV MONOFAZAT ȘI FRECVENȚĂ JOASĂ**

**3.1. Schema electrică de principiu** . . . . . 141
**3.2. Schema de reglare fină a tensiunii cu ajutorul regulatorului fin** . . . . . 144
**3.3. Motorul de tracțiune monofazat tip serie pentru frecvența 16 2/3 Hz.** . . . . 147
3.3.1. Principiul de funcționare . . . . . 147

3.3.2. Tensiunea electromotoare și cuplul . . . . . 148
3.3.3. Comutația la motorul monofazat de tracțiune . . . . . 149
**3.4. Serviciile auxiliare** . . . . . 153

CAPITOLUL 4 — **LOCOMOTIVE ELECTRICE DE CURENT MONOFAZAT ȘI FRECVENȚA INDUSTRIALĂ, DE TIP EXPERIMENTAL**

**4.1. Generalități** . . . . . 155
**4.2. Locomotiva mono-trifazată Ganz-Kando** . . . . . 156
4.2.1. Convertizorul de fază . . . . . 157
4.2.2. Convertizorul de frecvență . . . . . 158
4.2.3. Motorul de tracțiune . . . . . 159
4.2.4. Variația vitezei locomotivei . . . . . 160
4.2.5. Frînarea electrică . . . . . 162
4.2.6. Concluzii asupra locomotivei Ganz-Kando . . . . . 162

**4.3. Locomotiva mono-trifazată cu reglare continuă a frecvenței** . . . . . 163
4.3.1. Schema electrică și principiul de funcționare . . . . . 163
4.3.2. Reglarea vitezei . . . . . 163
4.3.3. Frînarea electrică . . . . . 165
4.3.4. Concluzii . . . . . 165

**4.4. Locomotiva mono-continuă cu grupuri convertizoare rotative** . . . . . 165
4.4.1. Principiul constructiv și de funcționare . . . . . 165
4.4.2. Locomotiva Co-Co seria 14100 cu grupuri convertizoare rotative . . . 166
4.4.3. Concluzii privind locomotiva mono-continuă cu grupuri convertizoare rotative . . . . . 167

**4.5. Locomotiva de curent alternativ monofazat 50 Hz cu motoare monofazate tip serie** . . . . . 167
4.5.1. Generalități . . . . . 167
4.5.2. Motorul monofazat serie cu colector pentru frecvența industrială de 50 Hz . . . . . 168
4.5.3. Reducerea cuplului la demaraj . . . . . 171

**4.6. Locomotive electrice de curent alternativ monofazat 25 kV, 50 Hz de tipul mono-continuu cu ignitoare** . . . . . 171
4.6.1. Schema electrică a unei locomotive cu ignitroane . . . . . 172
4.6.2. Noțiuni generale asupra redresoarelor cu vapori de mercur . . . . . 173
4.6.3. Redresoare ignitronice pentru locomotive electrice . . . . . 176
4.6.4. Scheme de montaj a ignitroanelor pe locomotive . . . . . 181
4.6.5. Circuitul de răcire a ignitroanelor . . . . . 182
4.6.6. Parametrii cîtorva tuburi ignitronice folosite pe locomotive . . . . . 183

CAPITOLUL 5 — **LOCOMOTIVE ELECTRICE DE CURENT ALTERNATIV MONOFAZAT 50 Hz, 25 kV, CU REDRESOARE SEMICONDUCTOARE — DIODE**

**5.1. Schema circuitului principal de forță** . . . . . 184
**5.2. Redresarea monofazată pe locomotive** . . . . . 186
5.2.1. Noțiuni recapitulative din fizica semiconductoarelor . . . . . 186
5.2.2. Caracteristicile curent-tensiune . . . . . 189
5.2.3. Realizarea diodelor de siliciu de mare putere . . . . . 191

**5.3. Parametrii principali ai unei diode** . . . . . 193
**5.4. Legarea în serie şi în paralel a diodelor** . . . . . 195
**5.5. Scheme de montaj a diodelor pe locomotive** . . . . . 197
5.5.1. Tensiunea medie redresată . . . . . 198
5.5.2. Puterea de tip a transformatorului ($P_T$) . . . . . 198
5.5.3. Tensiunea inversă . . . . . 200

**5.6. Comutaţia curentului** . . . . . 200
**5.7. Funcţionarea punţii de redresare, alimentînd un motor de tracţiune** . . . . 203
5.7.1. Valoarea eficace a curentului redresat . . . . . 204
5.7.2. Valoarea eficace a curentului din primarul şi secundarul transformatorului . . . . . 205
5.7.3. Factorul de putere . . . . . 206

**5.8. Determinarea numărului de diode, la alcătuirea redresorului** . . . . . 207

**5.9. Protecţia redresorilor** . . . . . 208
5.9.1. Capacitatea de suprasarcină a unei diode de siliciu . . . . . 209
5.9.2. Supratensiuni de comutaţie . . . . . 210
5.9.3. Supratensiuni de origine externă în raport cu redresorul . . . . . 211
5.9.4. Metode de protecţie a redresoarelor la suprasarcini şi scurtcircuite . . 212

**5.10. Aparataj şi utilaj principal** . . . . . 215
5.10.1. Întrerupător automat principal (disjunctorul) . . . . . 215
5.10.2. Descărcătorul cu rezistenţă variabilă . . . . . 219
5.10.3. Motorul de curent ondulat . . . . . 220
5.10.4. Motorul de tracţiune de curent ondulat tip LJE-108/1 folosit pe LE–CFR . . . . . 224
5.10.5. Motorul de tensiune ondulată . . . . . 225

**5.11. Reglarea vitezei pe partea de înaltă tensiune a transformatorului** . . . . . 227
5.11.1. Generalităţi . . . . . 227
5.11.2. Scheme de principiu şi condiţiile tehnice ale reglării tensiunii prin transformator . . . . . 228
5.11.3. Reglarea pe înaltă tensiune cu graduator tip BBC . . . . . 231
5.11.4. Reglarea pe înaltă tensiune cu graduator tip ASEA . . . . . 234

**5.12. Transformatorul** . . . . . 237
5.12.1. Elemente constructive şi funcţionale . . . . . 237
5.12.2. Determinarea treptelor de tensiune la bornele motorului de tracţiune şi corespunzător a prizelor de tensiune la înfăşurarea de reglare a transformatorului . . . . . 239
5.12.3. Stabilirea puterii de dimensionare a înfăşurării transformatorului 242

**5.13. Serviciile auxiliare** . . . . . 245
5.13.1. Servicii auxiliare cu motoare monofazate directe 50 Hz . . . . . 246
5.13.2. Serviciile auxiliare cu convertizor ARNO . . . . . 246
5.13.3. Convertirea statică mono-trifazată . . . . . 249
5.13.4. Asupra fiabilităţii motoarelor serviciilor auxiliare . . . . . 253
5.13.5. Servicii auxiliare cu motoare de curent ondulat . . . . . 255

**5.14. Frînarea electrică reostatică la locomotivele monofazate cu redresoare.** 255
**5.15. Caracteristicile principale ale LE –060 – EA (CFR)** . . . . . 259

CAPITOLUL 6 — **LOCOMOTIVE ELECTRICE CU TIRISTOARE**


**6.1. Generalităţi privind tiristoarele** . . . . . 261
6.1.1. Procesele de blocare inversă şi de blocare directă . . . . . 261
6.1.2. Conducţia . . . . . 262

**6.2. Legarea în paralel şi în serie al tiristoarelor** . . . . . 264
**6.3. Scheme de montaj al tiristoarelor pe locomotive** . . . . . 264
6.3.1. Punte complet tiristorizată . . . . . 265
6.3.2. Punte tiristorizată mixtă . . . . . 268
6.3.3. Înserierea punţilor tiristorizate mixte . . . . . 271
6.3.4. Determinarea factorului de putere la punţile tiristorizate mixte înseriate . . . . . 271
**6.4. Avantajele şi dezavantajele aplicării tiristoarelor pe locomotivele monofazate** 276
**6.5. Frînarea electrică recuperativă** . . . . . 277
**6.6. Calculul şi trasarea caracteristicilor de tracţiune la locomotivele cu redresoare** 284


CAPITOLUL 7 — **PARTEA MECANICĂ A LOCOMOTIVELOR ELECTRICE**


**7.1. Generalităţi** . . . . . 287
**7.2. Acţionarea osiilor motoare** . . . . . 288
7.2.1. Descărcarea osiilor datorită efectului cuplului de cabraj . . . . . 289
7.2.2. Soluţii constructive adoptate pentru diminuarea cabrajului . . . . . 293

**7.3. Suspensia motoarelor de tracţiune şi transmiterea cuplului motor** . . . . 295
7.3.1. Variante constructive . . . . . 295
7.3.2. Motorul semisuspendat . . . . . 297
7.3.3. Motorul suspendat cu antrenarea osiei prin angrenaj suspendat . . . 304
7.3.4. Motor suspendat cu antrenarea osiei prin angrenaj semisuspendat 308
7.3.5. Boghiu monomotor . . . . . 314

**7.4. Angrenaj de tracţiune** . . . . . 321
7.4.1. Generalităţi . . . . . 321
7.4.2. Elemente de calcul . . . . . 322
7.4.3. Verificarea angrenajului la uzură . . . . . 326
7.4.4. Calculul randamentului transmisiei . . . . . 327
7.4.5. Exemplu de calcul a unui angrenaj . . . . . 327

**7.5. Cutia** . . . . . 330
7.5.1. Tipuri constructive . . . . . 330
7.5.2. Ventilarea cutiei . . . . . 331

**7.7. Amplasarea echipamentului şi amenajarea cutiei** . . . . . 335
7.6.1. Condiţii generale . . . . . 335
7.6.2. Repartizarea greutăţii cutiei pe boghiuri . . . . . 335
7.6.3. Repartiţia sarcinilor statice pe osii . . . . . 337

**7.7. Noţiuni fundamentale asupra aderenţei la locomotivele electrice** . . . . . 339
7.7.1. Consideraţii generale . . . . . 339
7.7.2. Îmbunătăţirea coeficientului de aderenţă roată-şină . . . . . 340
7.7.3. Influenţa părţii electrice asupra folosirii aderenţei . . . . . 343
7.7.4. Valori practice pentru coeficientul de aderenţă . . . . . 343

7.7.5. Influența caracteristicii de tracțiune, a alimentării și a reglării motorului de tracțiune asupra aderenței . . . . . 346
7.7.6. Dispozitivul de antipatinare al LE—060—EA (CFR) . . . . . 351

CAPITOLUL 8 — **TRENURI ELECTRICE AUTOMOTOARE**

**8.1. Considerații generale** . . . . . 354
**8.2. Necesitatea tracțiunii electrice cu rame sau trenuri electrice automotoare și condiții tehnice impuse acestora** . . . . . 355
**8.3. Rama electrică suburbană CFR** . . . . . 362

8.3.1. Schema circuitului principal de forță . . . . . 366
8.3.2. Instalația de comandă și reglare . . . . . 366
8.3.3. Schema electrică de comandă a regimului de tracțiune . . . . . 370
8.3.4. Motorul electric de tracțiune . . . . . 374
8.3.5. Serviciile auxiliare . . . . . 375
8.3.6. Performanțe . . . . . 382

**8.4. Rama electrică seria ET 420 a căilor ferate RFG** . . . . . 382
**8.5. Elemente de calcul privind performanțele ramelor electrice** . . . . . 388

CAPITOLUL 9 — **PROBLEME ACTUALE PRIVIND CONSTRUCȚIA, REGLAREA ȘI ÎNCERCAREA LOCOMOTIVELOR ELECTRICE**

**9.1. Tendințe actuale privind construcția părții mecanice a locomotivelor electrice pe șase osii (formula osiilor Bo—Bo—Bo)** . . . . . 391
**9.2. Locomotive electrice de curent monofazat de 50 Hz, 25 kV, cu tiristoare de o concepție tehnică nouă** . . . . . 403
**9.3. Reglarea prin impulsuri de tensiune (chopper) a motoarelor de curent continuu** 413
**9.4. Tipuri de încercări și metodologia de încercare pentru locomotive și rame electrice, înainte de dare în serviciu** . . . . . 426

*Bibliografie* . . . . . 440

## Capitolul 1

# PROBLEME GENERALE PRIVIND TRACȚIUNEA ELECTRICĂ ȘI LOCOMOTIVELE ELECTRICE

## 1.1. INSTALAȚIILE PRINCIPALE ALE UNEI CĂI FERATE ELECTRICE

Pentru a electrifica o linie de cale ferată este necesar să fie construite o serie de instalații proprii acestui scop. Schița de principiu, cu instalațiile esențiale aferente unei căi ferate electrificate, este redată în figura 1.1.

În linii mari, aceste instalații sînt următoarele:

— instalații producătoare de energie electrică (centrale termo și hidroelectrice);

— linii electrice pentru transportul energiei electrice la mare distanță (acestea funcționează la tensiuni înalte, de 110...220 kV în cazul țării noastre);

— instalații pentru racordarea căii ferate electrice la liniile de transport, adică așa-numitele substații de tracțiune, care au drept scop să transforme curentul trifazat 50 Hz și tensiunea înaltă luată de la linia de transport în alt fel de curent și într-o altă valoare de tensiune necesară căii ferate electrice;

— linia de contact, care este o rețea electrică aeriană construită de-a lungul căii ferate, de la care locomotiva absoarbe energia electrică;

— locomotiva electrică, care primește energie electrică de la linia de contact și o transformă în energie mecanică la obada roților, necesară remorcării vagoanelor;

— șinele, care în afară de rolul lor de cale de rulare, îndeplinesc, în cazul tracțiunii electrice, și o funcție specială, aceea de conductor de întoarcere a curentului la substația de tracțiune.

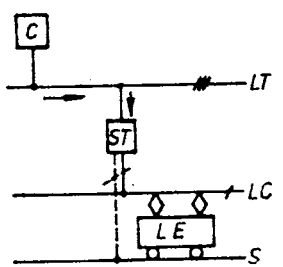



*Fig. 1.1.* Schema instalațiilor principale ale unei căi ferate electrice: *C* — centrală electrică; *LT* — linie de transport de energie electrică; *ST* — substația de tracțiune; *LC* — linie de contact; *LE* — locomotiva electrică; *S* — șina de rulare.

Din instalațiile menționate, cele legate de producerea, transportul și distribuția, energiei electrice intră în preocupările ministerului de resort (în cazul țării noastre Ministerul energiei electrice).

În acest sens, calea ferată electrică apare ca orice alt consumator industrial, iar administrației de cale ferată îi rămîne ca sarcină construcția și exploatarea instalațiilor cu caracter strict feroviar, adică:

— a instalațiilor fixe de energoalimentare (substații de tracțiune și linia de contact);

— a locomotivelor electrice.

Pentru întreținerea și exploatarea instalațiilor fixe de tracțiune este necesar a fi construite și dotate cu materiale și personal specializat sectoarele de întreținere și secțiile de energoalimentare.

În vederea gospodăririi locomotivelor electrice, în general se amenajează și se dotează corespunzător depourile existente.

Trebuie menționat că electrificarea unei linii ferate impune rezolvarea și a altor lucrări care, în funcție de condițiile locale, pot intra cu o pondere importantă în ceea ce privește investiția, ca de exemplu:

— sistematizarea stațiilor, ripări de linii și consolidări impuse de sporirea lungimilor utile ale liniilor de garare și crearea de culoare pentru plantarea stîlpilor liniei de contact;

— reconstrucția lucrărilor de artă (poduri, pasarele, tunele) care nu respectă gabaritul pentru electrificare;

— reconstrucția traversărilor liniilor de energie electrică de înaltă și de joasă tensiune care nu respectă condițiile tehnice și gabaritul la traversare peste o cale ferată electrică;

— rectificarea de trasee, în special mărirea razelor curbelor în linie curentă;

— protecția liniilor de telecomunicații, a liniilor de distribuție de energie electrică pentru joasă tensiune, a conductelor și cablurilor subterane, care sînt influențate de linia de contact a căii ferate electrice.

Este de subliniat că în afara categoriilor de instalații evidențiate mai sus, odată cu electrificarea se mai execută de cele mai multe ori, și alte instalații neimpuse de electrificare însă care contribuie la sporirea capacității de transport și siguranța circulației, ca spre exemplu : centralizarea stațiilor, introducerea blocului de .linie automat ... Aceste instalații dacă s-ar executa ulterior electrificării ar conduce la dificultăți în execuție (scoaterea parțială a electrificării din funcțiune, măsuri suplimentare de protecție ...) și costuri suplimentare la investiție.

## 1.2. SISTEME DE TRACȚIUNE ELECTRICĂ FEROVIARĂ

Prin sistem de tracțiune electrică feroviară se înțelege felul curentului și tensiunea la linia de contact.

În exploatare se întîlnesc următoarele sisteme, menționate în ordinea cronologică a apariției lor:

— sistemul curentului trifazat cu frecvența 25 Hz și tensiunea 1,5; 3; 6 kV, aplicat la primele electrificări de cale ferată în Elveția și în nordul Italiei;

— sistemul curentului continuu, cu tensiunea 1,5 și 3 kV răspîndit în U.R.S.S., Franța, Italia, Anglia, Spania, Cehoslovacia;

— sistemul curentului monofazat cu frecvența joasă 16 2/3 Hz și tensiune 15 kV, răspîndit în Elveția, Suedia, Austria, Norvegia, R.F.G., R.D.G. și ale țări;

— sistemul curentului monofazat cu frecvență industrială 50 Hz și tensiune 25 kV.

Acest din urmă sistem este consacrat în exploatare începînd de prin anul 1950 și se remarcă tendința aproape generalizată de adoptare a lui atît în

țările care au trecut la electrificare în ultima perioadă cît și în țările care au deja rețea feroviară electrificată într-unul din celelalte sisteme dar care își continuă electrificarea.

1.2.1. **Sistemul curentului trifazat.** Schema de principiu simplificată pentru realizarea acestui sistem este redată în figura 1.2, din a cărei legendă rezultă și echipamentul principal.

Se subliniază că o cale ferată electrică este considerată un consumator de gradul 1, adică nu admite întreruperi în alimentare decît în cazuri de forță majoră. Pentru acest considerent substațiile de tracțiune (indiferent de sis-

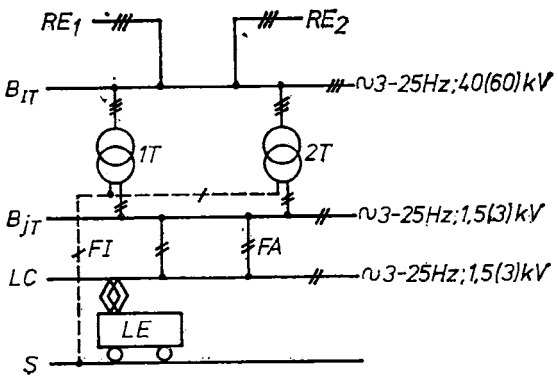



*Fig. 1.2.* Schema de principiu pentru sistemul de electrificare în curent alternativ trifazat: $RE_1$, $RE_2$ — racord electric de la sistem; $B_{IT}$ — bara de înaltă tensiune (primară); $1T$, $2T$ — transformator; $B_{jT}$ — bara de joasă tensiune (secundară, sau de tracțiune); $LC$ — linia de contact; $FA$ — fider de alimentare; $FI$ — fider de întoarcere; $LE$ — locomotiva electrică; $S$ — șina.

temul de electrificare) se realizează cu dublu grad de siguranță (două racorduri electrice la sistemul energetic: $RE_1$, $RE_2$; două agregate de transformare-convertire: $1T$, $2T$ (unul în funcțiune, altul rezervă rece integrală); doi fideri de alimentare: $1FA$, $2FA$...)

În cazul acestui sistem de electrificare, substația de tracțiune este un simplu transformator trifazat coborîtor de tensiune, linia de contact comportă două faze, iar cea de a treia este șina, iar locomotiva electrică necesită două pantografe în funcțiune (cîte unul de fiecare fază). Motorul electric de tracțiune este asincron trifazat. Acest motor ridică probleme dificile în ceea ce privește reglarea turației, iar din necesități de robustețe impune un întrefer mare care implicit conduce la un factor de putere scăzut.

Știind că schema echivalentă a unei mașini de inducție se poate considera alcătuită dintr-o rezistență omică $R$ și o inductanță $L$ înseriate, atunci,

$$\cos \varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (L\omega)^2}},$$

ceea ce arată că pentru ameliorarea lui trebuie coborîtă frecvența curentului de alimentare ($\omega = 2\pi f$). Aceasta este dealtfel și justificarea folosirii frecvenței $f = 25$ Hz, la acest sistem de electrificare. Dacă se mai ține seama și de dificultatea ce o ridică realizarea liniei de contact bifilară se înțelege că acest sistem nu a fost abordat decît experimental la începutul tracțiunii electrice pe cîteva linii din nordul Italiei și Elveției și chiar de atunci a fost complet abandonat.

1.2.2. **Sistemul curentului continuu.** Acest sistem este prezentat în figura 1.3. Alimentarea substațiilor de tracțiune se face din sistemul energetic (c.a. trifazat — 50 Hz și înaltă tensiune, de exemplu 110 kV, formă de energie care evident se va găsi și la bara de înaltă tensiune a substației $B_{IT}$). Convertirea curentului trifazat în curent continuu se obține prin grupul transformator-redresor ($1T-1R$). Pentru redresarea curentului se folosește redresorul polianodic cu vapori de mercur (mai recent ignitronul). În tehnica actuală se utilizează semiconductoare de siliciu. În substațiile de tracțiune mai vechi, convertirea curentului alternativ în curent continuu se făcea cu ajutorul unui grup rotativ motor-generator.

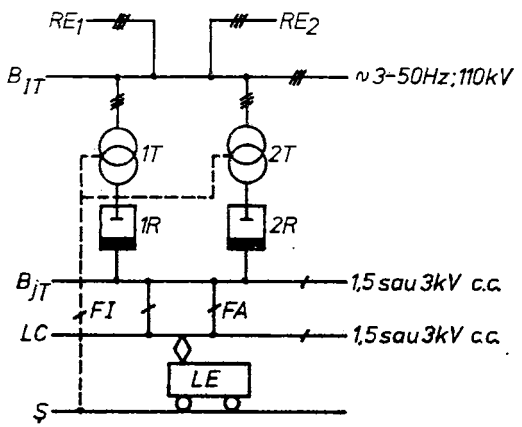



*Fig. 1.3.* Schema de principiu a sistemului de electrificare în curent continuu 1,5(3) kV: $1R$, $2R$ — redresor; (restul notațiillor și specificația, idem ca la fig. 1.2).

Tensiunile reglementate prin norme *(UIC)* pentru tracțiunea electrică în curent continuu sînt: 0,75—1,5—3 kV. Tensiunea 0,75 kV este rezervată pentru transportul urban (tramvai, troleibuz, metrou), iar 1,5 și 3 kV pentru tracțiunea feroviară.

Pînă în prezent, din considerente de comutație tensiunea nominală pe motorul de tracțiune de curent continuu este limitată la 1,5 kV. Pentru cazul tensiunii 3 kV la linia de contact se leagă în permanență pe locomotivă două motoare în serie. Limitarea tensiunii la 3 kV la linia de contact mai este impusă și de aparataj (contactoare, rezistențe, întrerupătoare automate ...), încălzirea electrică a trenului, motoarele serviciilor auxiliare.

Dintre dezavantajele mai importante ale sistemului de electrificare feroviară în curent continuu se menționează următoarele:

a) Substațiile de tracțiune pentru convertirea curentului sînt complicate și costisitoare;

b) Tensiunea scăzută la linia de contact conduce la curenți mari (pentru o putere dată) ceea ce impune o secțiune mare a suspensiei catenare (300—600 mm² cupru); căderile mari de tensiune în linie impun distanțe mici între substații (15—20 km la 1,5 kV și 30—40 km la 3 kV) și ca atare numărul lor mare;

c) Pentru redresarea curentului se folosesc redresoarele statice (cu vapori de mercur sau diode siliciu) care este în prezent soluția generalizată. Se știe că în această situație curentul redresat și trimis în linia de contact nu este perfect continuu, ci pulsatoriu (ondulat), care se poate considera ca fiind compus dintr-o componentă continuă pură și o serie de armonice (curenți alternativi), cu frecvențe crescînde și amplitudini descrescînde.

Dezvoltînd în serie Fourier curentul ondulat rezultă:

$$i = I_0 + I_3 \sin(\omega_3 t + \varphi_3) + I_6 \sin(\omega_6 t + \varphi_6) + I_9 \sin(\omega_9 t + \varphi_9) \ldots$$

Armonicele dominante și care produc neajunsuri sînt cele de ordinul 3, 6, 9 ... adică cele cu frecvența 300—600—900 Hz ..., armonicele de ordin superior fiind neglijabile. Aceste armonice avînd frecvența în banda frecvențelor vocale, prin inducție provoacă perturbații în liniile de telecomunicații vecine căii ferate (în special la cele aeriene) și ele scăpînd pe linia de contact intră în locomotivă și agravează comutația motoarelor de tracțiune.

Eliminarea acestui neajuns se face introducînd la bara de tracțiune a substației niște filtre (circuite $LC$ — inductanță, capacitate) acordate pentru frecvențele armonicelor dominante (fig. 1.4), adică pentru fiecare filtru se îndeplinește condiția de rezonanță:

$$L_3\omega_3 = \frac{1}{C_3\omega_3};\ L_6\omega_6 = \frac{1}{C_6\omega_6} \cdots$$

pulsația $\omega_3 = 2\pi f_3 = 2\pi \cdot 300$ rad/sec;

$$\omega_6 = 2\pi \cdot 600 \cdots$$

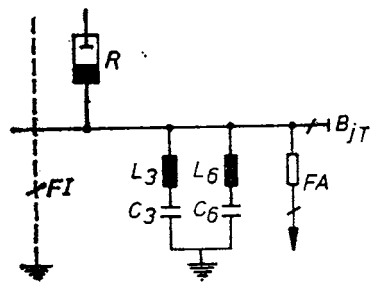



*Fig. 1.4.* Schema pentru filtrarea armonicilor de curent.

Impedanța filtrului va fi: $Z_3 = \sqrt{R_3^2 + \left(L_3\omega_3 - \frac{1}{C_3\omega_3}\right)^2}$, unde $R_3$ este valoarea rezistenței ohmice (foarte mică) a bobinei $L_3$ din filtru.

Condiția de rezonanță fiind îndeplinită, impedanța $Z_3$ a filtrului va fi numai $R_3$ și deci armonica de $f_3 = 300$ Hz se va scurge la pămînt și nu va mai scăpa pe linia de contact;

d) Dacă în vecinătatea liniei ferate există canalizații metalice subterane (conducte de apă, de gaze, de produse petrolifere, cabluri electrice, cabluri telefonice, poduri metalice, poduri de beton armat ...) acestea sînt expuse fenomenului de electrocoroziune datorită curenților vagabonzi (de dispersie).

Producerea curenților de dispersie rezultă din figura 1.5.

O parte din curentul de tracțiune $I_L$ se întoarce la substație prin șină, care constituie conductorul de întoarcere. Întrucît așa cum este pozată șina, pe traverse și balast, nu este considerată izolată față de pămînt, în mod inevitabil, o parte din curentul de tracțiune se derivă prin pămînt (curenți vagabonzi).

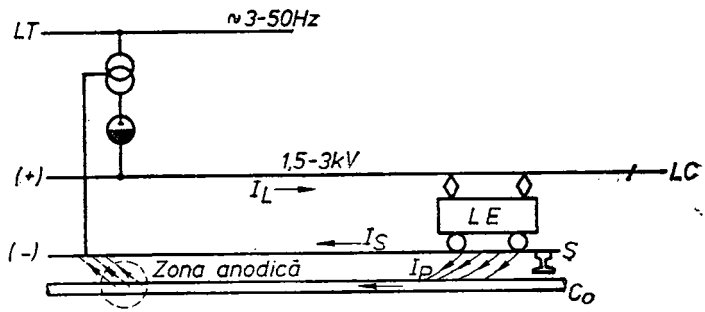



*Fig. 1.5.* Producerea curenților de dispersie.

În condiții defavorabile, dispersia curentului poate atinge 50% din curentul de sarcină. Dacă în zona de propagare a curenților vagabonzi există conducte metalice, acestea devin inevitabil conductori ai curenților.

În locurile de intrare a curenților vagabonzi din pămînt în conducte și la parcurgerea curenților de-a lungul conductelor metalice, curenții vagabonzi nu prezintă vreun pericol pentru conductele metalice subterane; în schimb în zonele unde curenții vagabonzi părăsesc conductele metalice (zone anodice) se produce un fenomen de electrocoroziune (migrațiune de ioni metalici de la conductă în mediul înconjurător) care conduce la deteriorarea în scurt timp a canalizațiilor metalice subterane.

Poziția zonelor anodice nu este ceva fix, ea depinde de umiditatea și componența chimică a solului; potențialul instalațiilor și intensitatea curentului de scurgere din zonele anodice sînt greu de determinat prin calcul. Măsurile ce trebuie luate sînt impuse de măsurătorile efectuate pe teren.

Se consideră expuse grav fenomenului de electrocoroziune toate canalizațiile metalice subterane aflate într-o zonă de cca 100 m de la linia ferată și care păstrează un paralelism mai lung cu linia căii ferate.

Metodele practice pentru diminuarea efectelor curenților vagabonzi constau din:

— reducerea dispersiei curentului de tracțiune din șine în pămînt, în care scop se eclisează șinele căii ferate la joante și se efectuează conexiuni transversale între diversele șine ale căii, cu conductori de cupru 70 mm$^2$.

—măsuri suplimentare care se iau pe rețeaua metalică subterană utilizînd metoda drenajului electric și protecția catodică.

Principiul drenajului electric este schițat în figura 1.6.

*Drenajul electric* se realizează prin legarea instalației de protejat la șină (—), cu un cablu de drenaj.

În felul acesta curenții care ies din conductă sau cablul respectiv nu mai trec prin sol (mediul electrolitic) și fenomenul electrochimic al coroziunii nu mai poate avea loc în acel punct.

Sensul curentului este cel indicat pe figură cu săgeată plină. Pentru evitarea unei scurgeri de curent de la șină spre conductă (sensul săgeată punctată)

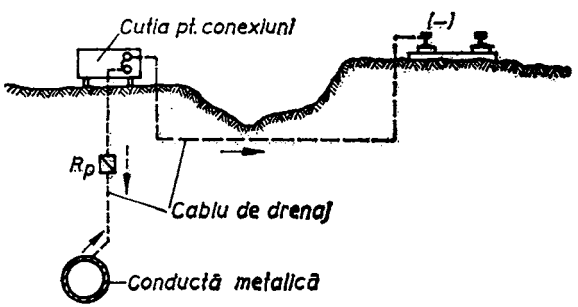



*Fig. 1.6.* Schema drenajului electric.

se montează un releu polarizat $R_p$ realizînd astfel metoda drenajului electric cu releu polarizat.

*Protecția catodică* se aplică atunci cînd distanța dintre conductele metalice și șinele căii ferate este mare și ar ocaziona investiții mari în cablul de drenaj. Principiul este indicat în figura 1.7.

Protecția catodică constă într-o încărcare catodică față de mediul electrolitic înconjurător a conductei de protejat, fără a mai face o legătură electrică între conductă și șină, utilizînd o sursă de curent continuu străină de cea de tracțiune.

Sursa de curent continuu în mod curent se obține de la orice sursă alternativă generală și un redresor. Forța electromotoare străină se intercalează în serie între conducta de protejat care se leagă la (—), încărcare catodică, și o priză de pământ ($P\dot{p}$) care se leagă la (+) devenind anod față de pământ cu un potențial mai ridicat decît al acestuia. În consecință forța electromotoare absoarbe curentul din conductă, împiedicîndu-l să iasă din conductă

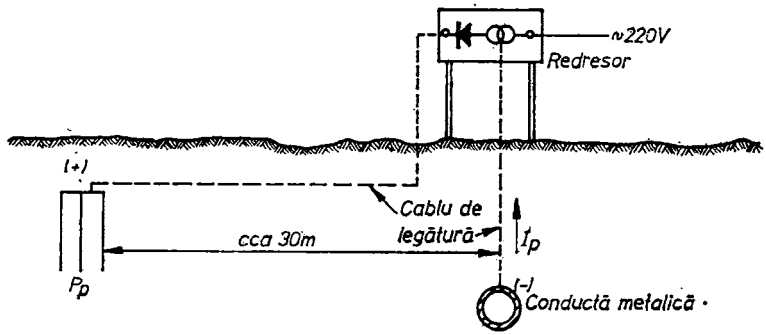



*Fig. 1.7.* Schema protecției catodice.

direct în pământ și îl dispersează în pământ prin priza $P\dot{p}$, la o distanță minimă de 30 m deci în alt loc, evitîndu-se astfel corodarea.

Se menționează că $I_p$ avînd valori mari impune dimensionarea sursei (transformator-redresor) în mod corespunzător ceea ce complică instalația. Soluția se limitează la cazuri excepționale.

Numărul și plasarea instalațiilor de drenaj și protecție catodică se fixează inițial aproximativ, pe bază de date statistice, iar definitivarea lor se face pe bază de măsurători la teren după darea în exploatare.

e) De regulă generală, punctele din sistemul energetic unde se poate face racordul substațiilor sînt situate cam la 60—100 km, iar distanța între substații fiind mult mai mică (15—40 km), alimentarea substațiilor se realizează după o schemă ca în figura 1.8.

Din stațiile sistemului energetic (SSE) se realizează o linie de transport de medie tensiune (de exemplu 35 kV) proprie numai alimentării substațiilor

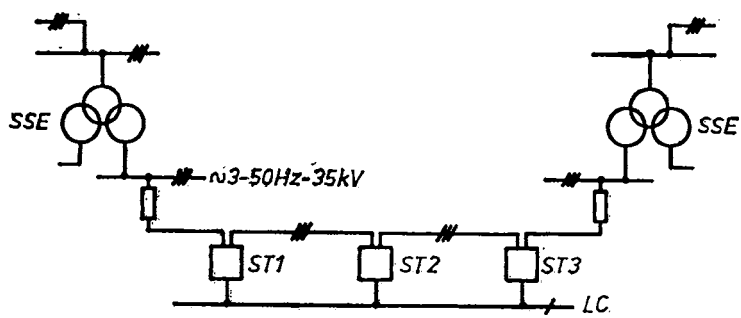



*Fig. 1.8.* Schema alimentării substațiilor de tracțiune din sistemul energetic: $S_{SE}$ —stație a sistemului energetic.

de tracțiune. Această soluție cu racordarea substațiilor prin intră-iese a liniei 35 kV oferă însă și avantajul alimentării pe la două capete a fiecărei substații.

Sistemul de electrificare în curent continuu are însă și unele avantaje deosebite:

a) Substațiile de tracțiune înzestrate cu redresoare prezintă un randament ridicat la toate sarcinile și se pretează ușor la automatizare;

b) Substațiile de tracțiune permițînd alimentarea lor din rețeaua generală trifazică, înseamnă că se încadrează în sistemul energetic al țării respective;

c) Locomotiva electrică este înzestrată cu electromotor de tracțiune de curent continuu tip serie care prezintă o caracteristică foarte bună pentru tracțiune. Din punct de vedere tehnic este astăzi astfel realizat încît se pretează excelent la cele mai dure condiții reclamate de o exploatare feroviară. Acesta este dealtminteri motivul esențial pentru care s-a adoptat în largă măsură sistemul curentului continuu;

d) Locomotivele de curent continuu se realizează ușor cu frînă electrică reostatică și recuperativă.

Dintre țările care au electrificare feroviară importantă în sistemul continuu menționăm: Franța, Italia, Anglia, Spania, Polonia, U.R.S.S., Belgia, Cehoslovacia.

1.2.3. **Sistemul curentului monofazat de joasă frecvență (16 2/3 Hz) și tensiune 15 kV.** Acest sistem de electrificare feroviară se întîlnește în exploatare în următoarele țări: R.F.G., R.D.G., Elveția, Austria, Suedia, Norvegia ... și este realizat, din punct de vedere al alimentării cu energie electrică, în trei variante și anume:

— *Varianta 1:* producerea și transportul energiei electrice direct în curent monofazat 16 2/3 Hz (fig. 1.9).

De regulă centralele electrice *C* sînt ale sistemului energetic în curent alternativ trifazat 50 Hz și au incluse și agregate separate speciale pentru producerea curentului monofazat 16 2/3 Hz, tensiune 110 kV (spre exemplu).

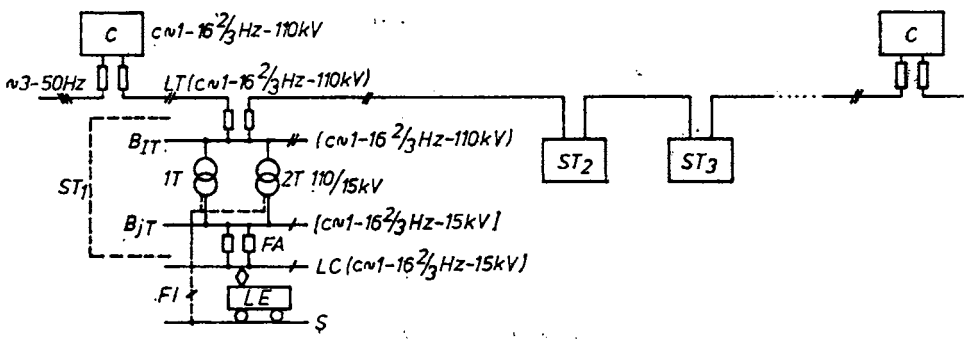



*Fig. 1.9.* Sistem de electrificare feroviar în curent monofazat 16 2/3 Hz, 15 kV — varianta cu producerea și transportul energiei electrice în monofazat și 16 2/3 Hz.

Linia de transport de energie lucrează sub aceeași formă de energie și servește exclusiv pentru alimentarea substațiilor de tracțiune. Ca structură, substațiile de tracțiune comportă numai transformator monofazat coborîtor de tensiune (cea mai simplă soluție de substație de tracțiune).

— *Varianata 2*: post central convertizor de fază și frecvență, de regulă inclus în stații ale sistemului energetic (fig. 1.10).

La bara trifazată 50 Hz și înaltă tensiune (de ex. 110 kV) a stației sistemului energetic se racordează și se instalează un post central *(PC)* convertizor de fază și frecvență care comportă:

— transformator trifazat coborîtor de tensiune ($T_1$ 110/3 kV)

— un grup rotativ convertizor de fază și frecvență (MS-motor sincron trifazat + $G\sim 1$ alternator monofazat și 16 2/3 Hz)

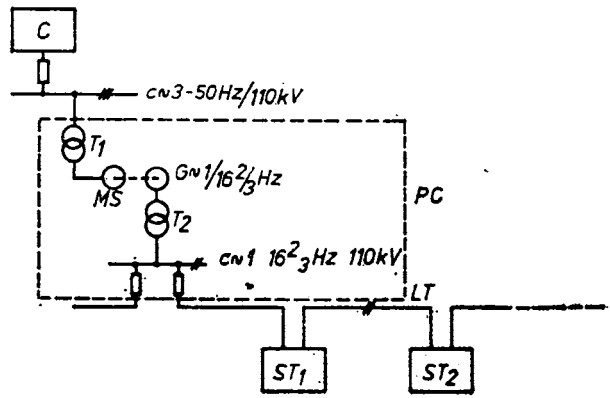



*Fig. 1.10.* Sistem de tracțiune electrică feroviară în curent monofazat 16 2/3 Hz. 15 kV — varianta cu post central convertizor de fază și frecvență.

— transformator monofazat urcător de tensiune ($T_2$).

Linia de transport ($LT$) și substațiile de tracțiune ($ST_1$, $ST_2$ ...) sînt realizate în aceeași soluție ca în varianta 1.

— *Varianta 3:* substații de tracțiune individuale convertizoare de fază și frecvență (fig. 1.11).

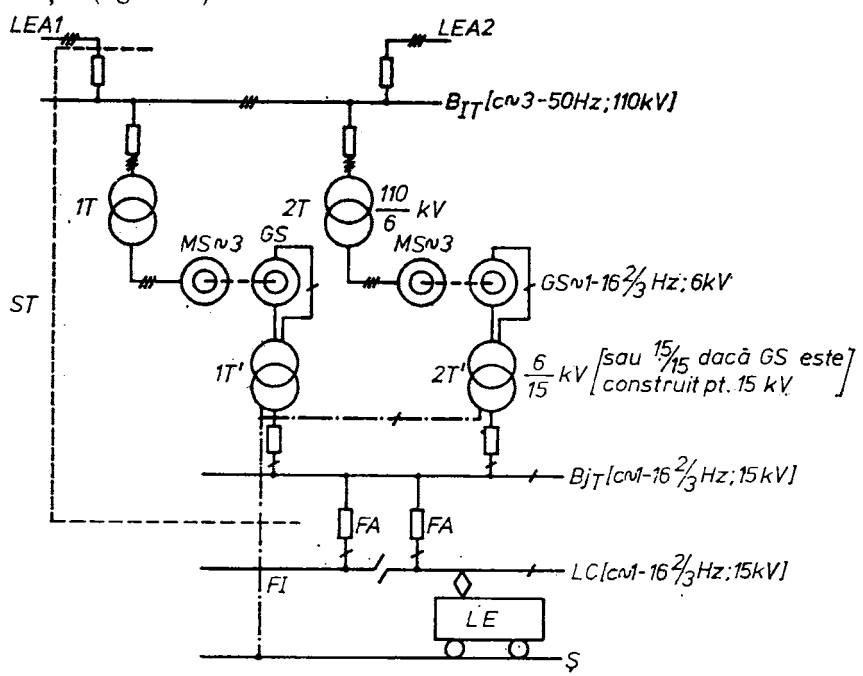



*Fig. 1.11.* Sistem de tracțiune electrică feroviară în curent monofazat 16 2/3 Hz, 15 kV — varianta cu substație de tracțiune convertizoare de fază și frecvență.

În această variantă substațiile se racordează la sistemul energetic general (~3 — 50 Hz și înaltă tensiune), iar convertirea fazei (din trifazat în curent monofazat) și a frecvenței (din 50 în 16 2/3 Hz) se face individual pe fiecare substație folosind: un transformator trifazat coborîtor de tensiune ($1T$), un agregat rotativ (motor sincron trifazat — $MS$, generator sincron monofazat pentru 16 2/3 Hz ~ $G$ ~ 1). Între bara de tracțiune ($B_{JT}$) și generatorul monofazat 16 2/3 Hz ($GS$) se interpune obligatoriu transformatorul tampon $T'$ care preia loviturile de sarcină (suprasarcinile accidentale) ale tracțiunii, cunoscut fiind că mașinile sincrone (în speță $GS$) nu suportă suprasarcini; transformatorul avînd o impedanță mare suportă suprasarcini de scurtă durată apreciabile. Dacă tensiunea generatorului este sub 15 kV atunci transformatorul face și funcția de urcător de tensiune; cînd tensiunea generatorului este 15 kV ca la linia de contact, atunci raportul de transformare a lui $T'$ va fi 15/15 = 1.

*Dezavantajele sistemului monofazat 16 2/3 Hz:*

— Varianta 3 presupune o substație de tracțiune foarte complicată, necesită suprafețe mari, are randament scăzut.

— Variantele 1 și 2 presupun un sistem energetic propriu pentru tracțiune.

— Linia de contact funcționînd în curent alternativ monofazat, prin fenomenul de inducție, perturbă liniile de telecomunicații din apropierea căii ferate electrice.

În vederea remedierii perturbațiilor asupra liniilor de telecomunicații se impune fie cablarea acestora și trecerea lor subterană, fie utilizarea de soluții tehnice speciale pentru protecție (de exemplu transformatori sugători).

— Sistemul monofazat ridică o serie de complicații în ceea ce privește realizarea instalațiilor de centralizare a stațiilor de cale ferată (comenzile circuitelor de cale se dau în general în curent alternativ și drept conductor se folosește șina $C.F.$).

— Locomotiva electrică este înzestrată cu motor de tracțiune monofazat 16 2/3 Hz serie cu colector care are caracteristică de tracțiune similară cu aceea a motorului de curent continuu, însă este de o construcție mai complicată și prezintă deficiențe mai serioase în ceea ce privește fenomenul comutației.

Pentru realizarea unui motor monofazat de tracțiune cu funcționare acceptabilă, a fost nevoie să se scadă frecvența la 16 2/3 Hz. De asemenea pentru a căpăta tensiunea joasă necesară funcționării motoarelor de tracțiune, pe locomotivă este instalat un transformator monofazat coborîtor de tensiune.

*Avantajele sistemului monofazat 16 2/3 Hz:*

— Linia de contact funcționînd la o tensiune ridicată (15 kV) rezultă că secțiunea firului de contact va fi redusă (150—200 mm$^2$) ceea ce conduce la o catenară de construcție ușoară și deci un consum de cupru redus.

De asemenea între substațiile de tracțiune se aleg în mod curent distanțe 50—70 km, conducînd la un număr redus de substații ce trebuie instalate.

Aceste avantaje au condus la extinderea sistemului pe scara sus-menționată.

— În privința locomotivei este de semnalat că din cauza transformatorului montat pe ea și realizat cu secundarul cu multe trepte de tensiune, locomotiva prezintă o mare elasticitate în exploatare (numeroase caracteristici

de tracțiune). Stadiul actual de construcție al motorului monofazat 16 2/3 Hz serie pentru tracțiune este atît de perfecționat încît poate rivaliza cu motorul serie de curent continuu.

— Dispunînd de curent alternativ de joasă tensiune pe locomotivă, problema serviciilor auxiliare este mai simplu rezolvată.

1.2.4. **Sistemul curentului monofazat de freevență industrială (50 Hz) și tensiune 25 kV.** Pentru ca investițiile în instalațiile fixe de tracțiune să fie cît mai reduse, un sistem de electrificare trebuie să satisfacă următoarele condiții principale:

— alimentarea substațiilor de tracțiune să se facă din sistemul energetic național;

— tensiunea la linia de contact să fie aleasă la o valoare cît mai ridicată, ceea ce permite distanță mare între substații (deci număr redus) și o linie de contact de construcție ușoară;

— din punct de vedere constructiv, substațiile de tracțiune să fie cît mai simple.

Toate aceste condiții sînt îndeplinite în largă măsură de sistemul de electrificare în curent monofazat 50 Hz — 25 kV.

Soluția cea mai simplă de realizare a acestui sistem este redată în schema din figura 1.12.

Substația este echipată cu transformator monofazat coborîtor de tensiune (110/25 kV) legat între două faze ale sistemului trifazat de alimentare, dintre care una (faza *S*) devine bara de tracțiune pentru alimentarea liniei

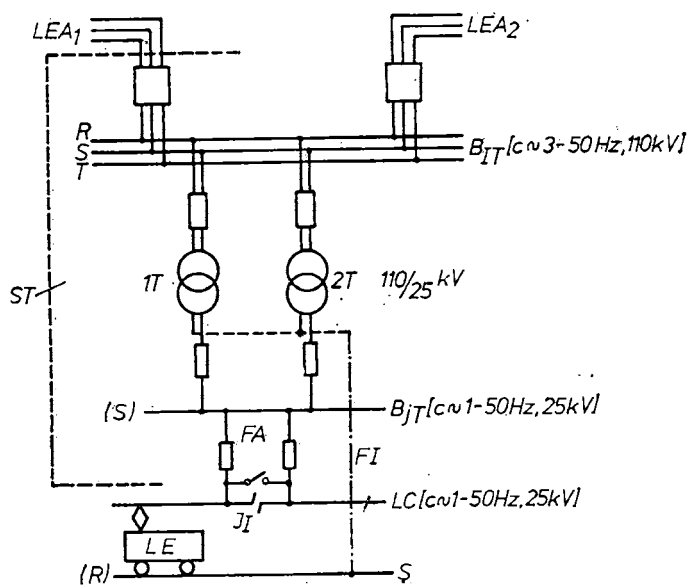



*Fig. 1.12.* Sistem de electrificare în curent monofazat 50 Hz, 25 kV, cu substație de tracțiune echipată cu transformatoare monofazate conectate simplu între două faze.

de contact, iar cealaltă (faza *R*) se leagă la șină. În această soluție, substația de tracțiune este extrem de simplă din punct de vedere constructiv, necesitînd numai două transformatoare monofazate (1 *T* activ; 2 *T* rezervă).

Este știut însă că un sistem energetic de distribuție trifazat este un sistem simetric, adică vectorii de tensiune sînt egali și decalați la 120°, iar curenții

din cele trei faze sînt egali. Racordarea unui consumator monofazat între două faze ale sistemului trifazat (este și cazul din fig. 1.12) provoacă dezechilibrul acestuia în sensul că introduce disimetrii de curent și de tensiune, așa că din sistem simetric devine sistem asimetric.

Folosind metoda componentelor simetrice *(metoda Stokvis)* pentru analiza sistemelor asimetrice se poate ajunge la următoarele expresii aproximative pentru disimetrii (fig. 1—13):

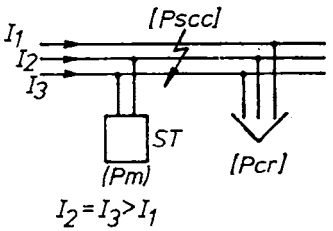



*Fig. 1.13.* Schema conectării consumatorilor monofazați și trifazați, la un sistem simetric trifazat: $P_m$ — puterea consumatorului monofazat; $P_{cr}$ — puterea consumatorului trifazat raional; $P_{sc.c}$ — puterea de scurtcitcuit a sistemului în punctul de racord.

— disimetria de curent, definită prin coeficientul de disimetrie de curent,

$$K_{di} \simeq \frac{P_m}{P_m + P_{cr}};$$

— disimetria de tensiune,

$$K_{du} \simeq \frac{P_m}{P_{sec}}.$$

Normele recomandă $K_{di} = 5 \ldots 15\%$ și se stabilește la generatoarele centralei celei mai apropiate (limita inferioară intră în considerare cînd generatoarele sînt de putere mai mică și randament scăzut), iar $K_{du} = 2 \ldots 5\%$ se stabilește la barele consumatorului raional trifazat cel mai apropiat (limita inferioară se ia în considerare cînd substația alimentează și consumatori trifazați raionali).

Din examinarea relațiilor de mai sus se constată că diminuarea disimetriilor și intrarea lor în norme are loc numai dacă sistemul energetic este puternic (numai în aceste condiții $P_{sc.c}$ și $P_{c.r}$ sînt mari).

În situația cînd $K_{di}$ depășește limita de mai sus, se nasc curenți inverși ce ajung la generatoare și provoacă vibrații și încălziri suplimentare, iar $K_{du}$ depășit provoacă înrăutățirea calității energiei la consumatorii trifazați apropiați. În aceste condiții furnizorul de energie nu acceptă racordarea substațiilor de tracțiune la sistem. De altminteri acesta a fost și primul argument care a împiedicat introducerea mai din vreme a acestui sistem de electrificare.

Pentru diminuarea disimetriilor în sistem, în prezent se recurge și la soluția substațiilor de tracțiune cu două transformatoare monofazate ($1T$, $2T$) conectate permanent în „$V/V$" între faze (fig. 1.14). Se observă că sînt folosite cele trei faze ale sistemului ($R$, $S$, $T$), iar bara de tracțiune este alcătuită din două faze distincte ($S$ și $T$) de unde se alimentează linia de contact (stînga — dreapta), iar în dreptul substației este necesar a se intro-

duce o separare electrică a fazelor (*ZN* — zonă neutrală). Transformatorul 3*T* (identic cu celelalte) servește ca rezervă rece integrală pentru oricare din cei doi transformatori activi (a se examina pe schemă modul lui de conectare).

În ansamblu alimentarea cu energie electrică a unei căi ferate în sistemul monofazat (50 Hz —25 kV) se face instalînd 2—3 substații de tipul prezentat în figura 1.12 (între aceleași faze), apoi una de tipul prezentat în figura 1.14 (cînd se rotesc fazele de alimentare), apoi iar 2—3 de tipul prezentat în figura 1.12 și din nou una de tipul prezentat în figura 1.14 ...

În privința locomotivei electrice care trebuie să funcționeze în condiții bune la curent monofazat 50 Hz — 25 kV se subliniază că au fost elaborate, cercetate și încercate în exploatare mai multe variante, în prezent consacrîndu-se locomotive de tip mono-continuu cu redresoare. Astfel și acest al doilea inconvenient care a frînat aplicarea în exploatare a sistemului monofazat 50 Hz — 25 kV a fost înlăturat. Se poate afirma că din anul 1955, cînd cele două neajunsuri menționate au fost înlăturate, acest sistem de electrificare s-a consacrat în practică și datorită avantajelor tehnico-economice față de sistemele clasice, este adoptat de mai toate țările care introduc tracțiunea electrică feroviară.

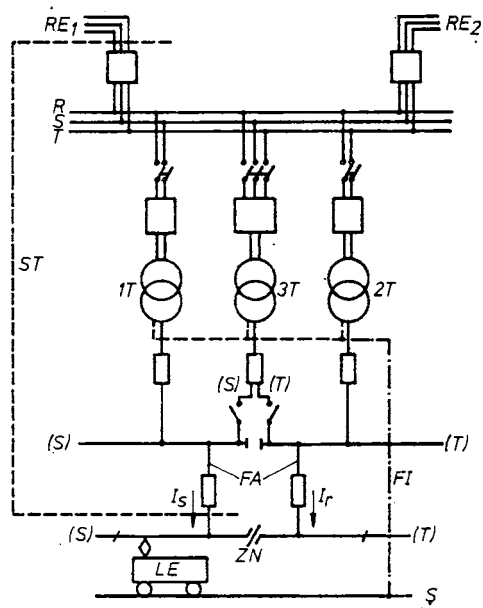



*Fig. 1.14.* Sistem de electrificare în curent monofazat 50 Hz, 25 kV cu substație de tracțiune echipată cu transformatoare monofazate conectate permanent în V/V între faze.

Din anul 1960 țara noastră a introdus acest sistem pentru electrificarea căilor ferate; în prezent sînt electrificate liniile magistrale grele ce traversează munții cît și unele linii cu profil mai ușor și trafic mare.

## 1.3. DEFINIȚII, CLASIFICĂRI ȘI SUBANSAMBLE COMPONENTE ALE LOCOMOTIVELOR ELECTRICE

În general, locomotiva este un vehicul motor de cale ferată capabil să producă o forță de tracțiune disponibilă la cîrligul de tracțiune și folosită pentru remorcarea unui convoi de vagoane.

Cînd sursa de energie nu este instalată pe locomotivă, ci ea își absoarbe energia de la o sursă exterioară (de exemplu, de la o linie de contact), iar pe locomotivă energia electrică se transformă în energie mecanică disponibilă la obada roților și de aici la cîrlig, pentru tracțiune, locomotiva se numește *locomotivă electrică.*

În afară de locomotive, ca vehicule motoare electrice de cale ferată se mai întîlnesc și automotoare electrice, care prezintă, față de locomotive, particularitatea că au în genere formă de vagon și în afara instalației de forță au amenajate pe ele și spații pentru transportul călătorilor. În exploatare se fac combinații după necesități: mai multe vagoane automotor și vagoane ramorcă (acestea nu au instalație de forță pe ele) alcătuiesc o rămă electrică sau un tren electric.

Clasificarea locomotivelor electrice se poate face după mai multe criterii.

După felul serviciului:

— locomotive pentru trenuri de călători;

— locomotive pentru trenuri de marfă;

— locomotive pentru serviciul de manevră.

După modul de acționare al osiilor:

— locomotive cu acționare colectivă (în grup) a osiilor, la care osiile motoare sînt antrenate în grup cu unul sau două motoare de tracțiune, după caz, montate pe boghiurile locomotivei;

— locomotive cu acționare individuală a osiilor, la care fiecare motor antrenează o singură osie motoare.

După dispoziția osiilor:

— locomotivă cu aderență totală, la care toate osiile sînt motoare (locomotivele electrice se construiesc în general cu aderență totală);

— locomotive cu aderență parțială, la care numai o parte din osii sînt motoare, restul fiind osii libere, care servesc la susținerea unei părți din greutatea locomotivei și conducerea ei la mersul în curbe.

După ecartamentul căii:

— locomotive de cale normală, pentru cale cu ecartamentul $e = 1\,435$ mm;

— locomotive de cale largă pentru calea cu ecartamentul mai mare decît cel normal ($e = 1\,524$ mm; $e = 1\,600$ mm și $e = 1\,676$ mm);

— locomotive de cale îngustă pentru calea cu ecartamentul mai mic decît cel normal ($e = 1\,000$ mm; $e = 760$ mm și $e = 600$ mm);

Sistemul de electrificare feroviară, adică felul curentului și tensiunea la linia de contact, formează un criteriu specific de clasificare, după care există:

— locomotive electrice de curent continuu;

— locomotive electrice de curent alternativ monofazat cu frecvență joasă (16 2/3 Hz) și 15 kV tensiune;

— locomotive electrice de curent alternativ monofazat cu frecvență industrială (50 Hz) și 25 kV tensiune.

Orice locomotivă este formată din două părți distincte:

— partea mecanică, ce comportă în principal aceleași elemente indiferent de tipul de locomotivă;

— partea de forță, care caracterizează și diferă de la un tip de locomotivă la altul.

În cazul locomotivelor electrice, partea electrică propriu-zisă este aceea care diferă de la un tip de locomotivă la altul.

Din punct de vedere mecanic o locomotivă poate fi considerată ca un ansamblu de elemente comportînd între ele legături elastice sau rigide, după

caz. Schema mecanică a unei locomotive este reprezentată în figura 1—15. Locomotiva se poate descompune în trei părți distincte:

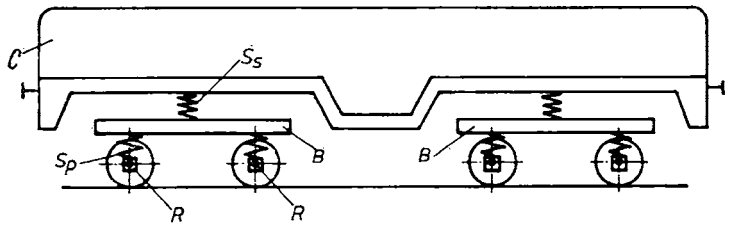



*Fig. 1.15.* Schema mecanică a unei locomotive.

— aparatul de rulare ($R$) alcătuit din osii și roți inclusiv organele respective (cutii de osii, angrenajul etc.); acest ansamblu constituie partea nesuspendată a locomotivei;

— boghiurile ($B$) care se sprijină pe aparatul de rulare prin intermediul suspensiei primare ($S_p$);

— cutia ($C$) care la rîndul ei se sprijină pe boghiuri, fie prin intermediul unei suspensii secundare elastice ($S_s$), fie prin intermediul unor sprijine rigide.

Suspensiile constituie legăturile verticale între diferitele elemente. Legăturile longitudinale și transversale sînt asigurate prin dispozitive elastice sau rigide.

Din punctul de vedere al soluției constructive a părții mecanice, locomotivele electrice pot fi realizate în variantele mai importante indicate în figura 1.16.

Soluția cea mai simplă este aceea cu șasiu unic (fig. 1.16, *a*) care suportă și cutia și care se sprijină pe două sau mai multe osii prin intermediul unor

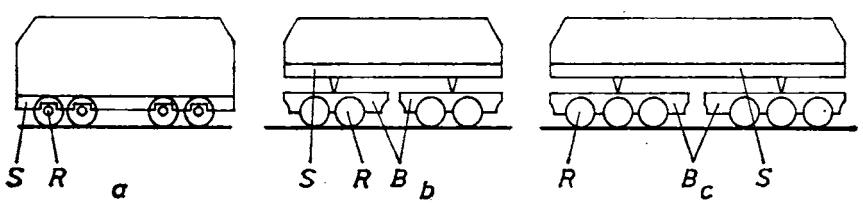



*Fig. 1.16.* Soluții constructive a părții mecanice a locomotivelor electrice : $S$ — șasiul cutiei; $B$ — boghiu; $R$ — aparatul de rulare.

legături elastice. Această formulă a fost larg utilizată la vehicule de mică putere; astăzi nu se mai folosește.

Soluția generalizată în prezent este construcția pe boghiuri (fig. 1.16, *b*, fig. 1.16, *c*) care comportă:

— un șasiu care suportă cutia;

— două sau mai multe cadre (șasiuri) rigide independente, denumite boghiuri, care se sprijină pe aparatele de rulare.

Variind numărul de boghiuri și numărul de osii în boghiuri se poate obține o varietate de combinații; cele uzuale sînt însă variantele prezentate în figura 1.17.

## 1.4. NOTAREA SIMBOLICĂ A LOCOMOTIVELOR ELECTRICE

În practica internațională se obișnuiește ca un tip de locomotivă să fie notat convențional printr-un simbol, care definește modul de construcție al părții mecanice, și anume: formula osiilor, modul de acționare al osiilor și soluția adoptată pentru realizarea părții mecanice (cu boghiuri sau cu șasiu unic rigid).

În uzanța curentă se întîlnesc două sisteme de notare:

— un sistem care folosește litere majuscule ale alfabetului latin și cifre arabe;

— un sistem care folosește numai cifre arabe, practicat cu precădere în U.R.S.S.;

În primul sistem menționat:

— osiile motoare aparținînd aceluiași boghiu, respectiv șasiului unic rigid, se notează cu litere majuscule; poziția literei în alfabet indică numărul osiilor motoare (*B* — două osii motoare, *C* — trei osii motoare, *D* — patru osii motoare);

— osiile purtătoare se notează cu cifre (*1* — o osie purtătoare, *2* — două osii purtătoare);

— dacă osiile motoare sînt cu acționare individuală, litera majusculă care le desemnează se prevede cu indicele zero ($B_0$ — două osii motoare, fiecare osie cu acționare individuală; $D_0$ — patru osii motoare, fiecare cu acționare individuală); osiile motoare cuplate se notează numai cu literă majusculă fără indicele zero;

— precizarea că osiile motoare aparțin aceluiași boghiu, se face marcînd litera majusculă cu apostrof; această indicație suplimentară arată și numărul boghiurilor locomotivei ($B_0'$ — boghiu cu două osii motoare acționate individual; $B_0' - B_0'$ — locomotivă cu două boghiuri fiecare boghiu cu două osii motoare cu acționare individuală; $C_0'$ — boghiu cu trei osii motoare acționate individual);

— o locomotivă compusă din două unități cuplate se notează folosind semnul plus, așezat între notația simbolică a celor două unități (notația $B_0' - B_0' + B_0' - B_0'$, corespunde unei locomotive compuse din două unități identice $B_0' - B_0'$).

În cel de-al doilea sistem menționat:

— atît osiile motoare cît și osiile purtătoare se notează prin cifre arabe, valoarea cifrei indicînd numărul de osii;

— precizarea că osiile motoare sînt cu acționare individuală se face în același mod ca la notația precedentă;

— indicarea că osiile motoare aparțin unui aceluiași element constructiv (boghiu, bisel, șasiu mic) se face ca în sistemul precedent;

— precizarea că osiile motoare aparțin aceluiași boghiu se face ca la sistemul precedent;

— o locomotivă compusă din două unități cuplate se notează cu plasarea semnului plus între notația simbolică a celor două unități, ca și la sistemul precedent.

Ținînd seamă de tendința actuală în construcția locomotivelor diesel și electrice, adică de generalizarea locomotivelor cu boghiuri a două osii sau cu boghiuri a trei osii și cu acționare individuală a osiilor, în notarea simbolică

se tinde spre o simplificare, în sensul că nu se mai indică în mod special acționarea individuală prin indicele zero (aceasta se presupune că se subînțelege) și nici nu se mai indică prin apostrof gruparea osiilor într-un boghiu (de asemenea se presupune că se subînțelege).

Pentru exemplificare, în figura 1.17 sînt prezentate cîteva formule constructive de locomotive electrice uzuale, cu notare simbolică în cele două sisteme; în paranteză s-a scris notația simbolică simplificată.

Există construcții recente de locomotive diesel și electrice cu boghiuri monomotoare cu două sau trei osii (fiecare boghiu are un motor de tracțiune).

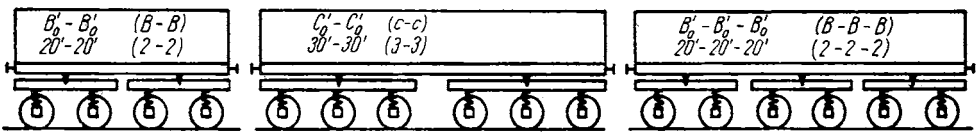



*Fig. 1.17.* Variante constructive uzuale de locomotive electrice.

iar antrenarea osiilor se face în grup prin angrenaj). Normele existente deocamdată nu reglementează notarea simbolică a acestora. Asemenea tipuri de locomotive se notează $B—B$ — monomotor, $C—C$ — monomotor, sau $B—B—B$ monomotor.

Unele administrații de cale ferată folosesc notații simbolice și mai simple, ca spre exemplu cele de la Căile Ferate Române, unde locomotiva electrică tip $C_0' — C_0'$ este notată $060—EA$; simbolul $E$ se referă la „electrică".

## 1.5. SCURT ISTORIC PRIVIND TRACȚIUNEA ELECTRICĂ

Apariția tracțiunii electrice este legată de realizarea primului motor electric și întrebuințarea lui în tehnică. Dintre etapele mai importante privind istoricul tracțiunii electrice se menționează:

— Anul 1834 cînd academicianul rus *B. S. Iacoby* a pus la punct motorul de curent continuu, iar în 1838 dotarea unui vas cu acest motor alimentat de la o baterie de elemente galvanice și experimentarea pe fluviul Neva. Același an 1834 este menționat ca început al tracțiunii electrice și în America cînd *Thomas Dovenport* construiește primul vagon electric de tramvai. Deasemenea în 1838 și în Anglia, *Robert Davidsohn* a construit un vagon motor electric experimental.

— Începuturile tracțiunii electrice feroviare sînt citate prin 1876 cînd inginerul rus *Teodor Apolonovici Pirotchi* a construit o locomotivă electrică a cărei alimentare era făcută prin șinele de rulare și făcea serviciu pe o linie ferată de 3,5 km lungime în orașul Sesbroreţk.

— În anul 1879 cu ocazia unei expoziții industriale la Berlin, firma germană *Siemens-Halske* a prezentat o locomotivă electrică înzestrată cu un motor de curent continuu 3 CP și 150 V care tracționa trei vagonete a 6 pasageri pe vagonet cu o viteză de 12 km/h pe un traseu circular de 300 m.

— În America prima locomotivă electrică este construită în statul New York prin 1883, iar primul tramvai electric în 1884.

— Este de menționat că în țara noastră în anul 1893 s-a dat în funcțiune primul tramvai electric în București pe traseul fostei linii 14 (Bulevardul

Republicii—Bulevardul Gh. Gheorghiu Dej—Statuia Leu); este considerată printre primele linii de tramvai electric din lume dată în exploatare curentă.

— Tracțiunea electrică feroviară pe linii magistrale s-a dezvoltat la începutul secolului nostru. Așa spre exemplu după anul 1920 cu ocazia planului general de electrificare GOELRO în U.R.S.S. s-au pus și bazele electrificării nodului feroviar Moscova, linii din zona industrială Sverdlovsc, linii grele din zonele muntoase Bacu și Caucaz.

În perioada dintre cele două războaie mondiale electrificările feroviare cunosc un avînt important în multe țări europene dezvoltate din punct de vedere economic. Germania, Anglia, Franța, Italia... În timpul celui de-al doilea război mondial și în perioada postbelică de refacere tracțiunea electrică pe calea ferată înregistrează o stagnare, iar după anul 1948 se reia problema în multe țări ale globului cu ritmuri spectaculoase în ceea ce privește lungimea liniilor de cale ferată electrificate și mai ales după perioada anilor 1950—1955 cînd au fost puse bazele și s-a consacrat sistemul de electrificare în curent alternativ monofazat 50 Hz — 25 kV.

— În ceea ce privește țara noastră este de subliniat că au existat preocupări vechi în privința introducerii tracțiunii electrice pe calea ferată:

— În anul 1920 s-a elaborat primul studiu de electrificare în curent continuu a liniei Brașov — Predeal.

— În anul 1930 s-a reluat problema în același sistem pentru linia Brașov — Predeal — Cîmpina.

— În anul 1940 au fost elaborate proiecte și caiete de sarcini pentru electrificarea liniei Brașov — Cîmpina — Ploiești în curent monofazat 16 2/3 Hz — 15 kV.

— În anul 1950 a fost reluată proiectarea liniei de mai sus în curent continuu 3 kV.

În niciuna din etapele de mai sus, realizarea propriu-zisă a lucrării nu s-a înfăptuit datorită unor probleme de investiție, sau interese ale unor cercuri politice influente în conjunctura acelor perioade.

— În anul 1960, ca urmare a directivelor P.C.R. s-a trecut la elaborarea documentației de execuție pentru linia Brașov — București în curent alternativ monofazat 50 Hz — 25 kV, de către Departamentul C.F.R. cu asistență tehnică de specialitate din partea U.R.S.S., inclusiv atacarea execuției primului tronson Brașov — Predeal. Începînd cu această dată electrificarea căilor noastre ferate cunoaște un ritm susținut și crescînd astfel că liniile magistrale grele ce traversează Carpații și unele mai ușoare cu trafic intens care însumează 2000 km lungime de exploatare sînt electrificate și date în exploatare (București — Brașov — Ciceu — Deda; București — Ploiești — Adjud — Ciceu; Craiova — Caransebeș — Reșița — Timișoara — Arad — Curtici; Filiași — Simeria — Deva; București — Fetești — Constanța...).

## 1.6. GENERALITĂȚI PRIVIND PARTEA ELECTRICĂ A LOCOMOTIVELOR ELECTRICE

O locomotivă electrică, dealtfel ca orice locomotivă, așa cum s-a arătat, are două părți distincte: partea mecanică și partea electrică. Multe din subansamblele părții mecanice (aparatul de rulare, boghiul, cutia, aparatele de

tracțiune și ciocnire, suspensia ...) nu diferă de la un tip de locomotivă la altul. Aceleași subansamble se întîlnesc și la locomotivele diesel-electrice, diesel-hidraulice ca și la cele electrice; evident pentru fiecare tip de locomotivă apar și unele particularități specifice constructive ale părții mecanice.

Partea electrică, însă, diferă esențial de la un tip de locomotivă electrică la alta. Dacă ne referim la sistemele de electrificare ale căilor ferate (sistemul curentului continuu, sistemul curentului monofazat 16 2/3 Hz și sistemul curentului monofazat 50 Hz), locomotivele electrice se pot clasifica în:

— locomotive electrice de curent continuu și 1,5 sau 3 kV;

— locomotive electrice de curent monofazat și joasă frecvență, 16 2/3 Hz, 15 kV.

— locomotive electrice de curent monofazat și frecvență industrială 50 Hz, 25 kV.

Pentru a ne putea forma o imagine asupra soluției constructive a părții electrice a unei locomotive trebuie să se precizeze:

— felul curentului și tensiunea la linia de contact (adică sistemul de electrificare);

— agregatul (agregatele) de adaptare (sau transformare) a felului energiei primită la pantograful locomotivei (dacă acesta există); dacă nu există agregat de adaptare, iar curentul și tensiunea de la linia de contact se aplică direct la motoarele de tracțiune, atunci locomotiva electrică se denumește „directă";

— tipul motorului electric de tracțiune.

Diversele organe sau subansamble ale unei locomotive trebuind să asigure: captarea curentului, demarajul și reglarea vitezei, inversarea sensului de mers, protecția circuitelor, diverse servicii auxiliare abosolut indispensabile funcționării ..., pentru studiu sau proiectare, de regulă generală, partea electrică se împarte în:

— circuitul principal de forță;

— circuitul serviciilor auxiliare;

— circuitele de comandă, protecție, semnalizare.

Evident, nu totdeauna se poate face o demarcație precisă între circuitele de mai sus, ci adesea unele elemente ale diverselor circuite se interpătrund.

## Capitolul 2

# LOCOMOTIVA ELECTRICĂ DE CURENT CONTINUU

## 2.1. LOCOMOTIVE ELECTRICE DE CURENT CONTINUU CLASICE

Electrificările feroviare în curent continuu sînt realizate după cum s-a menţionat, cu 1,5 şi 3 kV la linia de contact. Principiul circuitului principal de forţă al acestor locomotive este conceput după schemele elementare din figura 2.1.

Aceste locomotive sînt directe şi simple din punct de vedere al concepţiei părţii electrice, cu precizarea că plafonarea tensiunii la 1,5 kV este impusă în primul rînd de tensiunea nominală a motorului de tracţiune 1,5 kV (din motive de comutaţie în principal şi de izolaţie) şi apoi realizarea aparatajului de comutaţie (separatoare, automate, contactoare ..., rezolvarea încălzirii electrice a trenului, realizarea motoarelor serviciilor auxiliare ...).

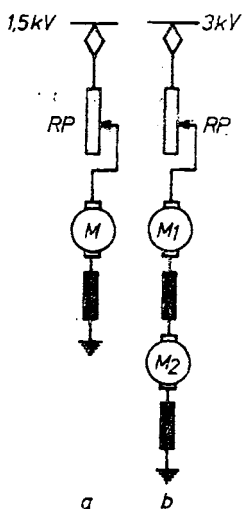



*Fig. 2.1.* Schema elementară a circuitului de forţă al locomotivei de curent continuu : *a* — locomotive de 1,5 kV; *b* — locomotiva de 3kV; *M* — motor de tracţiune; *RP* — reostat de pornire.

Pentru tensiunea 3 kV, schema elementară comportă legarea în permanenţă a două motoare de tracţiune în serie (fiecare motor în parte este supus la tensiunea nominală plafon de 1,5 kV.).

Aceste locomotive cunoscute şi sub denumirea de locomotive electrice de curent continuu „clasice", prezintă şi unele dezavantaje legate de necesitatea folosirii unui reostat de pornire şi reglare (pierderi de energie), slaba folosire a greutăţii aderente, limitarea puterii pe osie la valori scăzute în comparaţie cu alte tipuri de locomotive; aceste probleme se vor evidenţia pe parcurs.

## 2.2. LOCOMOTIVE ELECTRICE DE CURENT CONTINUU ŞI ÎNALTĂ TENSIUNE

Cu cît valoarea tensiunii la linia de contact creşte, cu atît mai mari sînt avantajele legate de realizarea instalaţiilor fixe de tracţiune electrică (economie de cupru în linia de contact, suspensia catenară mai uşoară şi mai simplă, substaţii mai puţine la număr...). Odată cu progresele remarcabile realizate de tehnica actuală a semiconductorilor de siliciu de mare putere, s-au făcut

cercetări și s-au realizat, cu titlu de experiment, locomotive de curent continuu pentru tensiunea 12 kV (în U.R.S.S.) în două variante: cu motorul de tracțiune tip serie de curent continuu (fig. 2.2, *a*); cu motorul de tracțiune asincron trifazat (fig. 2.2, *b*). La legenda figurii 2.2 s-a specificat și agregatele de adaptare rezultînd astfel soluția constructivă.

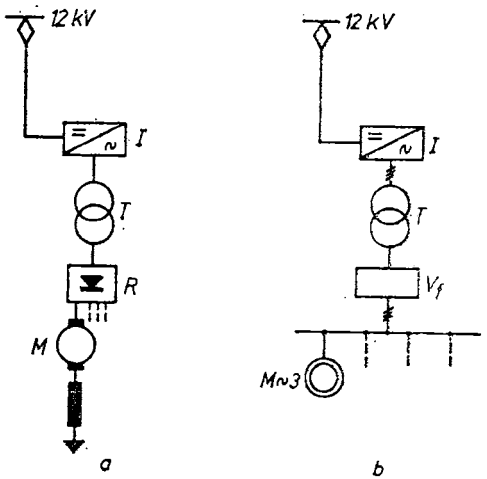



*Fig. 2.2.* Schema de principiu a locomotivelor de curent continuu de înaltă tensiune: *a* — varianta cu motor serie de curent continuu; *b* — varianta cu motor asincron trifazat; *I* — invertor (c.c. în c.a, cu tiristori); *T* — transformator coborîtor de tensiune, 12/1 kV); *R* — redresor (cu tiristori); *M* — motor serie de curent continuu; *M* ~ 3 — motor asincron trifazat; $V_f$ — variator de frecvență 0 ... 150 Hz pentru variația turației motorului asincron de tracțiune (respectiv viteza locomotivei).

Aceste locomotive au rămas în faza de experiment, nu se întîlnesc în exploatare și ca atare, în continuare se va trata locomotiva clasică de curent continuu.

## 2.3. CIRCUITUL PRINCIPAL DE FORȚĂ

Pentru formarea unei priviri de ansamblu asupra circuitului principal de forță, în figura 2.3 s-a reprezentat schema corespunzătoare unei locomotive de 1,5 kV tip Bo-Bo. În cazul unei locomotive de 3 kV schema este similară cu precizarea că pe o ramură se conectează cîte două motoare în serie (vor rezulta două ramuri).

În legenda figurii 2.3 s-a specificat echipamentul aferent, iar în tabelul 2.1 ordinea de închidere a contactoarelor pentru realizarea conectării serie, serie-paralel și paralel între motoare, precum și realizarea treptelor de șuntare (funcționarea în cîmp redus a motoarelor).

Diversele procese funcționale ale locomotivei se tratează și detaliază în paragrafele următoare. Referitor la echipamentul din schemă se fac următoarele precizări:

— izolarea și punerea la pămînt a unui pantograf avariat se face prin separatorul cu cuțit de punere la pămînt *(S)*;

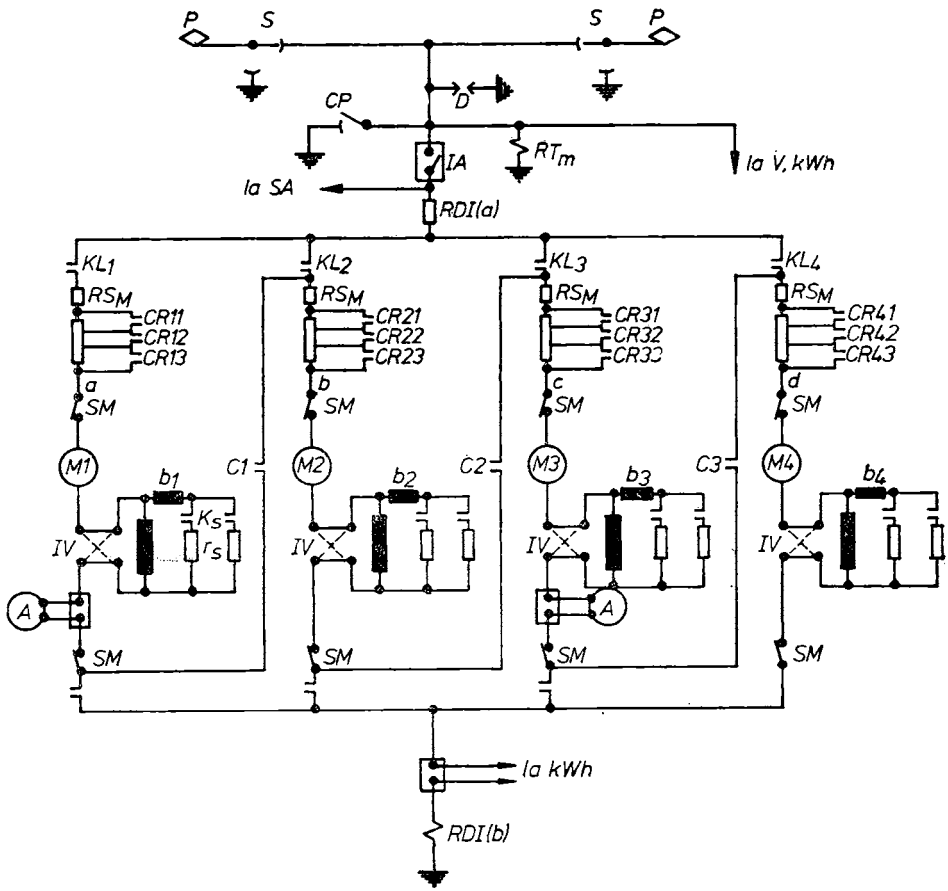



*Fig. 2.3.* Schema circuitului principal de forță la o locomotivă tip Bo — Bo pentru 1,5 kV. *P* — pantografe (captatoare de curent); *S* — separatoare cu cuțit de puntere la pămînt; *D* — descărcător; *CP* — comutator de punere la pămînt; *IA* — întreruptor automat principal; $RT_m$ — releu de tensiune minimă; *RDI(a)*, *RDI(b)* — releu diferențial de curent; $KL_1 \ldots KL_4$ — contactoare de linie pentru punerea motoarelor sub tensiune; *RP* — reostat de reglare; $RS_{M1} \ldots RS_{M4}$ — relee de sarcină pentru motoare; $S_M$ — separatoare pentru izolarea motorului (caz de avarie); *IV* — inversor de mers; $M_1 \ldots M_4$ — motoare de tracțiune serie (*c* — *c* — înfășurarea de excitație); *KS* — contactoare pentru șuntarea excitației; *b*, $r_s$ — bobină și rezistență de șuntare (șunt inductiv); $C_1 \ldots C_3$ — contactoare pentru interconectarea motoarelor.

— punerea la pămînt a barelor (conductorii) de pe acoperiș, pentru asigurarea personalului cînd lucrează la circuitele de înaltă tensiune din locomotivă, se face prin comutatorul de punere la pămînt *(CP)* care de fapt se află într-o „cutie de înzăvorîre" de unde se pot extrage cheile care permit accesul la aparatajul de înaltă tensiune, cînd toate condițiile de izolare și punere la pămînt sînt îndeplinite;

— alimentarea serviciilor auxiliare *(SA)* se face din circuitul principal de forță, la tensiunea liniei de contact; pentru alimentarea bobinelor de ten-

*Tabelul 2.1*

*ORDINEA DE INCHIDERE A CONTACTOARELOR*

| Treapta | | Contactori de linie | | | | Rezistențe | | | | | | | | | | | | Interconectare | | | | | | Cîmp redus | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | KL1 | KL2 | KL3 | KL4 | CR11 | CR12 | CR13 | CR21 | CR22 | CR23 | CR31 | CR32 | CR33 | CR41 | CR42 | CR43 | C2 | C1 | C3 | C4 | C5 | C6 | S11 | S12 | S21 | S22 | S31 | S32 | S41 | S42 |
| Serie | 1 | ● | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | ● | ● | ● | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| | 2 | ● | – | – | – | ● | – | – | – | – | – | ● | – | – | – | – | – | ● | ● | ● | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| | 3 | ● | – | – | – | ● | ● | – | ● | – | – | ● | – | – | ● | – | – | ● | ● | ● | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| | 4 | ● | – | – | – | ● | ● | – | ● | ● | – | ● | ● | – | ● | ● | – | ● | ● | ● | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| | 5 | ● | – | – | – | ● | ● | ● | ● | ● | – | ● | ● | ● | ● | ● | – | ● | ● | ● | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| | 6 | ● | – | – | – | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| Cîmp redus | 1 | ● | – | – | – | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | – | – | – | ● | – | ● | – | ● | – | ● | – |
| | 2 | ● | – | – | – | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | – | – | – | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| Trecere | 1 | ● | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | ● | ● | ● | – | ● | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| | 2 | ● | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | ● | ● | – | ● | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| Serie - paralel | 1 | ● | – | ● | – | ● | – | – | ● | – | – | ● | – | – | ● | – | – | – | ● | ● | – | ● | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| | 2 | ● | – | ● | – | ● | ● | – | ● | – | – | ● | ● | – | ● | – | – | – | ● | ● | – | ● | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| | 3 | ● | – | ● | – | ● | ● | – | ● | ● | – | ● | ● | – | ● | ● | – | – | ● | ● | – | ● | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| | 4 | ● | – | ● | – | ● | ● | ● | ● | ● | – | ● | ● | ● | ● | ● | – | – | ● | ● | – | ● | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| | 5 | ● | – | ● | – | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | – | – | ● | ● | – | ● | – | – | – | – | – | – | – | – | – |
| Cîmp redus | 1 | ● | – | ● | – | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | – | – | ● | ● | – | ● | – | ● | – | ● | – | ● | – | ● | – |
| | 2 | ● | – | ● | – | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | – | – | ● | ● | – | ● | – | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| Trecere | 1 | ● | – | ● | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | ● | ● | ● | ● | ● | – | – | – | – | – | – | – | – |
| | 2 | ● | – | ● | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | ● | ● | ● | – | – | – | – | – | – | – | – |
| Paralel | 1 | ● | ● | ● | ● | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | – | ● | ● | ● | – | – | – | – | – | – | – | – |
| | 2 | ● | ● | ● | ● | ● | – | – | ● | – | – | ● | – | – | ● | – | – | – | – | – | ● | ● | ● | – | – | – | – | – | – | – | – |
| | 3 | ● | ● | ● | ● | ● | ● | – | ● | ● | – | ● | ● | – | ● | ● | – | – | – | – | ● | ● | ● | – | – | – | – | – | – | – | – |
| | 4 | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | – | – | – | ● | ● | ● | – | – | – | – | – | – | – | – |
| Cîmp redus | 1 | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | – | – | – | ● | ● | ● | ● | – | ● | – | ● | – | ● | – |
| | 2 | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | – | – | – | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |

*Legendă:*

● *contactor închis*

– *contactor deschis*

siune și de curent ale aparatelor de măsură (voltmetre, contori ...) se iau derivații din circuitul principal (pentru tensiune), respectiv prin șunt (pentru curent);

— pe schemă s-au figurat și protecțiile de bază ale locomotivei (la supratensiuni prin descărcătorul $D$; la suprasarcini și scurtcircuite prin întrerupătorul principal $IA$; la tensiune minimă prin releul $RT_m$; punerea accidentală la masă prin releul diferențial de curent $RDI_{(a,b)}$; protecția motoarelor prin releul maximal de curent $RS_M$ ...).

## 2.4. MOTORUL ELECTRIC DE TRACȚIUNE

**2.4.1. Condiții de funcționare, gabarit și montaj, impuse de exploatare.** Funcționarea electromotorului în exploatare decurge în condiții deosebit de grele, din cauza sarcinii de tracțiune care este foarte variabilă chiar la același tren, datorită declivităților, curbelor, opririlor și a demarărilor. De aceea, electromotorul trebuie să aibă o capacitate mare de supraîncărcare, față de puterea lui medie, pentru a putea face față tracțiunii. Unui electromotor i se impun condiții suplimentare, dacă locomotiva electrică este înzestrată cu frîna electrică, în care caz el trebuie să funcționeze și în regim de generator. De asemenea, tensiunea care se aplică electromotorului are variații apreciabile uneori bruște, iar la desprinderea pentru scurtă durată a pantografului de pe linia de contact tensiunea este nulă; de aici rezultă regimul electric dificil de funcționare. Din punct de vedere mecanic electromotorul este supus în timpul mersului la șocuri și lovituri provocate de denivelările căii și mai ales la trecerea vehiculului peste rosturi și ace, de asemenea este expus diverselor influențe exterioare ca praf, ploaie, zăpadă.

Fiind montat pe materialul rulant, electromotorul are la dispoziție un spațiu restrîns, din care motiv el trebuie construit și cu o greutate cît mai mică și aranjat astfel încît să fie accesibil și comod pentru revizie, reparație și deservire în timpul exploatării.

În sfîrșit electromotorul de tracțiune trebuie să fie rentabil din punct de vedere economic, bine utilizat în ceea ce privește puterea în condițiile de circulație prevăzute și pentru profilul respectiv al liniei, avînd un randament și caracteristici corespunzătoare.

Aceste condiții restrictive cerute unui motor de tracțiune pentru vehicule impun o tratare specială a lui din punct de vedere al calculului și construcției. Cerința de a înscrie o putere mare pe osie cu un gabarit cît mai mic, impun la calcul alegerea limitelor maxime pentru inducție (B) și densitatea de curent (A/mm$^2$) care în final conduc la un regim termic puternic al motorului și un diametru mic al rotorului (din motive de gabarit). Regimul termic impune adoptarea răcirii forțate a motorului (debit de ordinul 100—120 m$^3$/min pentru motoarele locomotivelor magistrale), iar diametrul mic al rotorului conduce la tensiuni mari între două lamele consecutive ale colectorului (12—20 V) ceea ce agravează comutația motorului, pentru ameliorarea căreia se complică din punct de vedere constructiv, în sensul că se introduc polii auxiliari (de comutație) și înfășurare de compensație, în unele cazuri. Așezarea motorului pe locomotivă (pe boghiu sau în cutie) și transmiterea cuplului de la arborele motorului la osie implică unele complicații în realizarea carcasei sau chiar a rotorului motorului.

Calitățile constructive ale unui motor de tracțiune se apreciază prin randament și prin posibilitățile lui de supraîncărcare, prin consumul specific de material și prin greutatea caracteristică a materialelor active (cupru, fier).

Consumul specific de materiale active este determinat de expresiile:

$$c_{Cu} = \frac{G_{Cu}}{P}; \quad c_{Fe} = \frac{G_{Fe}}{P}.$$

Greutatea caracteristică a materialelor active este definită de relațiile:

$$q_{Cu} = \frac{G_{Cu}}{\left(975\frac{P}{n}\right)^{3/4}}; \quad q_{Fe} = \frac{G_{Fe}}{\left(975\frac{P}{n}\right)^{3/4}},$$

în care:

$G_{Cu}$ este greutatea totală a cuprului mașinii, în kg;
$G_{Fe}$ — greutatea totală a fierului activ al mașinii, în kg;
$P$ — puterea motorului, în kW;
$n$ — turația motorului, în rot/min .

În relațiile de mai sus, raportul $\frac{P}{n}$ reprezintă cuplul motorului; deci greutatea caracteristică a materialelor active este un indicator dictat de cuplul motorului, iar consumul specific de materiale active este un indicator dictat de putere.

Calitatea constructivă a unui motor mai este determinată și prin coeficientul constructiv;

$$K = \frac{G}{G_a},$$

în care:

$G$ este greutatea totală a motorului;
$G_a = G_{Cu} + G_{Fe}$ — greutatea activă.

2.4.2. **Tipuri de motoare de curent continuu.** Mașinile de curent continuu (motoarele și generatoarele), în mod obșnuit se clasifică (și se denumesc) după sistemul de excitație, iar tipurile uzuale sînt reprezentate (schema lor de conexiuni) în figura 2.4.

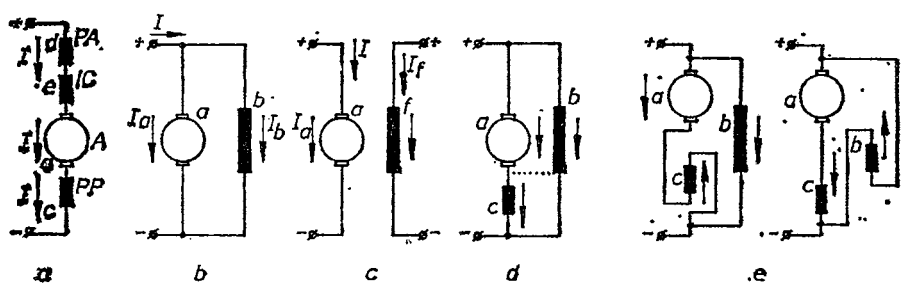



*Fig. 2.4.* Tipuri de mașini de curent continuu (motoare și generatoare) : *a* — motor cu excitație serie (motor serie) ; *b* — motor cu excitație derivație (motor șunt) ; *c* —motor cu excitație independentă (separată) ; *d*— motor cu excitație mixtă (motor compund, cînd $\Phi_c$ și $\Phi_b$ sînt aditive) ; *e* — motor cu excitație mixtă (motor anticompund, cînd $\Phi_c$ și $\Phi_b$ sînt diferențiale).

Din aceste tipuri de motoare, pînă în prezent motorul cu excitație serie (denumire uzuală — motor serie) este folosit în mod curent pe vehiculele de tracțiune electrică, datorită caracteristicelor sale favorabile acestui scop.

Pe unele troleibuze, unele locomotive diesel-electrice, sau unele locomotive electrice de tip mono-continuu cu grup rotativ se folosesc și motoarele cu excitație mixtă.

În ultima vreme, asociat cu tehnica semiconductoarelor începe să apară în tracțiunea feroviară și motorul cu excitație separată.

Un motor de curent continuu serie, în cazul general, dispune de patru înfășurări de excitație: polii auxiliari (*PA* — înfășurarea s-a notat, conform reglementărilor, cu *d*); înfășurarea de compensație (*IC* — respectiv *e*); indusul (*A* — înfășurarea *a*); polii principali (*PP* — sau înfășurarea de excitație *c*). Fiecare înfășurare este caracterizată prin rezistența sa omică, așa că rezistența totală a motorului, denumită și rezistența internă, va fi:

$$r = r_d + r_e + r_a + r_c.$$

La motoarele serie de curent continuu pur, înfășurarea de compensație nu se realizează în mod curent, iar rezistența $r_d$ se include de regulă în $r_e$ (ele sînt legate în serie) așa că rezistența internă se mai scrie, în mod curent:

$$r = r_a + r_c.$$

Toate înfășurările fiind legate în serie, valoarea curentului (*I*) va fi aceeași în toate înfășurările.

2.4.3. **Ecuațiile generale ale motorului serie.** Ținînd seamă de schema de conectare a motorului pe locomotivă (fig. 2.5) și a notațiilor respective, se reamintesc următoarele ecuații generale:

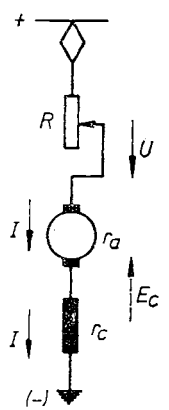



*Fig. 2.5.* Schema de conectare a motorului serie pe locomotivă.

— Tensiunea aplicată la bornele motorului, în V:

$$U = E_c + rI \tag{1}$$

— Tensiunea contraelectromotoare, în V:

$$E_c = kn\Phi;\ K = \frac{p}{a}\frac{N}{60} \text{ și } \Phi \text{ în weberi} \tag{2}$$

$E_c = K\ n\Phi\ 10^{-8}$; $\Phi$ în maxwelli.

— Cuplul la arborele motorului, în kgm;

$$C = K'\Phi I;\ K' = \frac{pN}{9{,}81.2\pi a} \text{ pentru } \Phi \text{ în Wb.} \tag{3}$$

— Puterea absorbită, în W:

$$P_a = UI. \tag{4}$$

— Puterea utilă (mecanică la arbore), în W:

$$P = P_a\eta_m;\ \eta_m \text{ — randamentul motorului.} \tag{5}$$

În ecuațiile de mai sus s-a notat:

- $r$ — rezistența internă a motorului ($r = r_a + r_c$), în ohmi
- $I$ — curentul absorbit, în A
- $n$ — turația, în rot/min
- $2p$ — numărul polilor ($p$ — numărul perechilor de poli)
- $2a$ — numărul căilor de curent
- $N$ — numărul conductoarelor active ale indusului

— Curentul la pornire, rezultă din (1) și (2):

$I = \frac{U - Kn\Phi}{r}$; pentru $n = 0$, $I_p = \frac{U}{r}$.

Întrucît rezistența circuitului motorului $r$ este foarte mică, fracțiuni de ohm ($r = 0{,}02 \ldots 0{,}05\ \Omega$ pentru motoarele de tracțiune de putere mare), rezultă un curent la pornire exagerat de mare:

$I_p = (15 \ldots 20)\ I$, unde $I$ este curentul nominal.

Limitarea curentului la pornire, se face introducînd un rezistor *(R)* înseriat în circuitul motorului care limitează curentul la pornire la valori acceptate de supraîncărcarea motorului,

$$I_p = \frac{U}{r + R} = (2 \ldots 2{,}5)I. \qquad (6)$$

Această soluție este obligatorie la locomotivele directe unde tensiunea liniei de contact ($U_{LC} = 1{,}5$ sau 3 kV) se aplică integral pe motorul de tracțiune. Pe măsură ce motorul turează ($n$ crește și implicit și $E_c = Kn\Phi$) și dacă $I_p$ trebuie menținut constant, cazul locomotivelor în perioada de demaraj pentru accelerarea trenului, atunci valoarea lui $R$ trebuie scăzută coordonat cu creșterea lui $n$, de unde rezultă că acest reostat de pornire și reglare trebuie realizat în trepte.

— Bilanțul puterilor la un motor serie de curent continuu, de construcție actuală (valabil și pentru motoarele de curent ondulat), este redat în diagrama prezentată în figura 2.6.

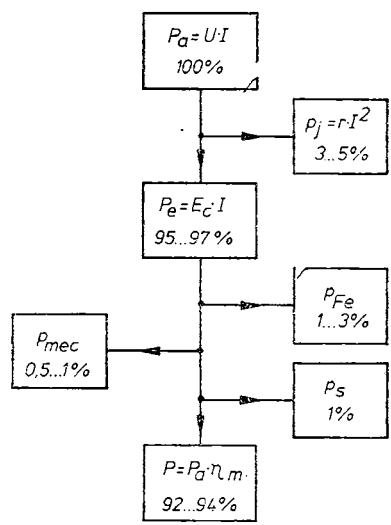



*Fig. 2.6.* Bilanțul puterilor la motoarele serie de curent continuu pentru tracțiune: $p_j$ — pierderi prin efect Joule; $p_{Fe}$ — pierderi în fier; $p_{mec}$ — pierderi mecanice; $p_s$ — pierderi suplimentare.

2.4 4. **Parametrii principali de definire a unui motor de tracțiune.** Un motor de tracțiune este definit prin următorii parametri:

— Tensiunea nominală $U$ (în volți), este aceea la care a fost calculat și încercat motorul și la care poate să funcționeze un timp nelimitat, cu o comutație bună. Pentru motoarele de tracțiune tensiunea nominală nu indică totdeauna și nivelul tensiunii la care se dimensionează izolația motorului față de masă; pentru cazul conexiunii fixe cu două motoare în serie (fig. 2.1, *b*) izolația

pentru fiecare motor în parte se prevede pentru tensiunea de la linia, de contact ($U_{LC}$ = 3 kV, deşi $U$ a motorului este 1,5 kV).

— Curentul nominal ($I$ în amperi) este valoarea la care motorul poate funcţiona un timp nelimitat, fără ca temperatura vreunei părţi componente să depăşească limitele prescrise.

— Turaţia nominală $n$ (în rot/min) este aceia care corespunde lui $U$ şi $I$ definiţi ca mai sus.

— Puterea nominală $P$ (în kW sau CP ca unitate de măsură tolerată), este considerată la arborele motorului şi corespunde lui $U$ şi $I$ definiţi ca mai sus.

— Randamentul nominal $\eta$, este definit ca raportul:

$$\eta = \frac{P}{P_a} = \frac{P}{P + \Delta P}$$

unde $\Delta P$ reprezintă suma pierderilor în motor de la arbore la borne (v. fig. 2.6).

— În tracţiunea electrică sînt în uz şi parametrii care caracterizează regimul uniorar de funcţionare al motorului, considerat *tot la tensiunea nominală* $U$ şi diferind *prin curentul de regim uniorar* $I_h$ definit ca valoarea curentului absorbit de motor timp de una oră, fără ca încălzirea prescrisă să fie depăşită. Între parametrii acestor două regimuri, pentru un motor dat, rezultă inegalităţile:

$$I_h > I;\ n_h < n;\ \eta_h < \eta.$$

Se defineşte coeficient de durată al unui motor de tracţiune, $K_d = \frac{I}{I_h}$ şi are următoarele valori practice:

- pentru motoare capsulate (la locomotive de mine), $K_d = 0{,}5 \ldots 0{,}6$;
- pentru motoare autoventilate (de obicei folosite la tramvai, troleibuz, metro, rame electrice), $K_d = 0{,}7 \ldots 0{,}88$;
- pentru motoare cu ventilaţie forţată (cazul locomotivelor electrice), $K_d = 0{,}85 \ldots 0{,}94$.

2.4.5. **Limitele de încălzire pentru motoarele de tracţiune de pe vehiculele electrice.** Acestea sînt reglementate prin normele *UIC** — fişa 610 — 0 (v. şi STAS 1893—72) şi sînt redate în tabelul 2.2 în funcţie de izolant şi metoda de măsurare a temperaturii.

Temperaturile se înţeleg pentru temperatura mediului ambiant cuprinsă între 10 şi 40°C.

Metoda de măsurare a temperaturii colectorului prin termometrul electric constă în aplicarea termometrului electric pe părţile accesibile ale colectorului în locurile presupuse cele mai încălzite, imediat după oprirea din funcţiune a motorului.

---

* *UIC* — Uniunea internaţională a căilor ferate (CFR este membru).

Termometrele electrice cuprind nu numai termocuple, ci de asemenea sonde electrice cu rezistențe, toate aceste aparate fiind în esență caracterizate printr-un răspuns mult mai rapid decît în cazul termometrelor obișnuite cu mercur.

*Tabelul 2.2*

**Limitele de încălzire pentru electromotoarele de tracțiune (Încercări la bancul de probă)**

| Izolant | Regim | Organele motorului | Metode de măsurare a temperaturii | Încălzirea, °C |
|---|---|---|---|---|
| Clasa A | Continuu | Înfășurări indus și stator | Rezistență | 85 |
| | | Colector | Termometru electric | 100 |
| | Uniorar | Înfășurări indus și stator | Rezistență | 100 |
| | | Colector | Termometru electric | 105 |
| Clasa E | Continuu și uniorar | Înfășurare indus | Rezistență | 105 |
| | | Înfășurare stator | Rezistență | 115 |
| | | Colector | Termometru electric | 105 |
| Clasa B | Continuu și uniorar | Înfășurare indus | Rezistență | 120 |
| | | Înfășurare stator | Rezistență | 130 |
| | | Colector | Termometru electric | 105 |
| Clasa F | Continuu și uniorar | Înfășurare indus | Rezistență | 140 |
| | | Înfășurare stator | Rezistență | 155 |
| | | Colector | Termometru electric | 105 |
| Clasa H | Continuu și uniorar | Înfășurare indus | Rezistență | 160 |
| | | Înfășurare stator | Rezistență | 180 |
| | | Colector | Termometru electric | 105 |

Determinarea încălzirii prin metoda variației de rezistență constă în a stabili temperatura, la sfîrșitul încercării, prin relația:

$$t_2 - t_a = \frac{R_2 - R_1}{R_1}(235 + t_1) + t_1 - t_a,$$

în care:

$t_a$ este temperatura aerului în timpul încercării, în °C;

$t_2$ — temperatura înfășurării la sfîrșitul încercării, în °C;

$t_1$ — temperatura înfășurării reci, înainte de începerea experienței (în momentul măsurării rezistenței inițiale) în °C;

$R_2$ — rezistența înfășurării la sfîrșitul încercării, în Ω;

$R_1$ — rezistența inițială a înfășurării reci, în Ω.

Clasele de izolație folosite la mașinile electrice de tracțiune sînt *A*, *B*, *F*, *H* (v. și STAS 6247—60).

Clasa de izolație *A* cuprinde materiale fibroase din celuloză sau mătase, impregnate (hîrtie, carton, țesături de bumbac, mătase, pelicule organe și emailuri); stabilitatea termică maxim 105°C.

Clasa de izolație *B* este alcătuită din materiale pe bază de mică, azbest și fibră de sticlă cu liant organic (micanită, țesături din fibră de sticlă cu lac, hîrtie și țesături din asbest); stabilitatea termică maxim 130°C.

Clasa de izolație *F*, idem ca la clasa *B*, sînt însă cu compuși de impregnare sintetici; stabilitatea termică maxim 130°C.

Clasa de izolație *H*, idem ca la clasa *B*, însă cu compuși de impregnare silico-organici; stabilitatea termică maxim 180°C. La motoarele electrice de tracțiune de construcție actuală se folosesc izolanți din clasele *F* și *H*.

2.4.6. **Caracteristicile funcționale ale motorului serie.** Pentru proiectarea unei locomotive și calculul performanțelor ei este necesar să se cunoască unele din caracteristicile electromecanice $n(I)$, $C(I)$, $\eta(I)$ și caracteristica mecanică $C(n)$ a motorului de tracțiune. Aceste caracteristici se ridică la stand în sarcină, pentru tensiunea nominală la borne (U) menținută constantă și se livrează de furnizorul motorului.

În cele de mai jos se tratează caracteristicile motorului serie, numai cele care interesează în mod deosebit în tracțiune, din punct de vedere calitativ (în scopul cunoașterii alurei) și al metodologiei de prelucrare a acestor caracteristici.

2.4.6.1. *Caracteristica turației, n(I).* Din relația turației $n = \frac{U - rI}{K\Phi}$, pentru motorul serie la care $\Phi = kI$ în regim nesaturat (în domeniul valorilor mici și uzuale ale lui *I*) și $\Phi$ = constant în regim saturat (în domeniul valorilor mari ale lui *I*), rezultă:

— pentru $I = 0$, $n \to \infty$

— pentru $I = \frac{U}{r}$ (valoarea exagerat de mare), $n = 0$ de unde rezultă că $n(I)$ variază după o curbă cu alură hiperbolică, așa cum se indică în figura 2.7.

Din examinarea relației turației și a caracteristicii respective se constată că la mersul în gol $I \to 0$, $\Phi \to 0$, respectiv $n \to \infty$; motorul serie se ambalează la mersul în gol (motorul dispune totuși de un flux remanent, însă de valoare mică), iar forța centrifugă exagerată ce apare în această situație periclitează înfășurarea rotorică și colectorul mașinii. În consecință, motorul serie nu poate funcționa în gol din motive de securitate mecanică și electrică.

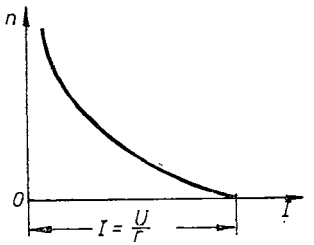


*Fig. 2.7.* Caracteristica turației $n(I)$ la un motor serie.

La mersul în gol, în mod practic, $I_0 \simeq 10\%$ $I$ ceea ce conduce la o creștere a turației $n_0 = (4...7)\ n$ care poate provoca ruperea bandajelor rotorului, deteriorarea înfășurării etc.; normele (STAS 1893-50) impun ca spor de turație de scurtă durată maxim 50% $n$.

În cazul în speță al vehiculelor electrice motoare, motorul de tracțiune este legat în permanență printr-un angrenaj cu organul de acționat (osia) și ca atare niciodată nu va fi pus în situația să funcționeze în gol.

Caracteristica $n(I)$ conferă o trăsătură specifică motorului serie, în sensul că la creșterea sarcinii ($I$), viteza ($n$) scade brusc; o asemenea *caracteristică este elastică* sau suplă, iar toate motoarele care au o caracteristică $n(I)$ asemănătoare sînt denumite motoare cu „caracteristică serie".

2.4.6.2. *Caracteristica cuplului*, $C(I)$. Ecuația cuplului se deduce simplu pornind de la relația puterii:

$$P = C\omega = C\frac{2\pi n}{60};\ C = \frac{60\,P}{2\pi n} = \frac{60\,F_e I}{2\pi n} = \frac{60\,K\Phi n I}{2\pi n} = K\Phi I.$$

În relația de mai sus s-a considerat cuplul electromagnetic pentru a putea scrie relația în mod mai simplu; față de cuplul la arborele motorului s-au neglijat pierderile.

În regim nesaturat, $\Phi = KI$ și $C = KI^2$ (o parabolă cu axa $ox$ tangentă în vîrf; $C' = 2KI$, unde pentru $I = 0$, $C = 0$).

În regim saturat, $\Phi \simeq$ constant și $C = KI$ (o dreaptă).

Alura caracteristicii $C(I)$ rezultă ca în figura 2.8.

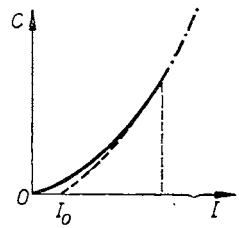


*Fig. 2.8.* Caracteristica cuplului $C(I)$ la un motor serie.

2.4.6.3. *Caracteristica puterii* $P(I)$. Pentru simplificare se aproximează puterea utilă $P$ egală cu puterea electromagnetică $P_e$ (deci se neglijează pierderile Joule).

$$P \simeq P_e = E_c I = (U - rI)\,I = UI - rI^2;$$

$$P' = U - 2rI.$$

Tabloul de variație al variabilei ($I$), derivata $P'$ și funcția $P$, rezultă:

| $I$ | 0 | | $U/2r$ | | $U/r$ |
|---|---|---|---|---|---|
| $P'$ | $(+U)$ | $+$ | $0$ | $-$ | $(-U)$ |
| $P$ | 0 | $\nearrow$ | $U^2/4r$ | $\searrow$ | |

iar curba de variație $P(I)$ este ca în figura 2.9.

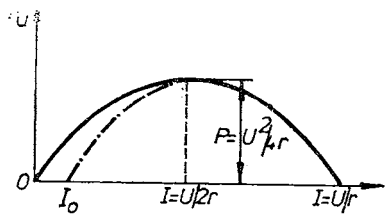



*Fig. 2.9.* Caracteristica puterii $P(I)$ la un motor serie.

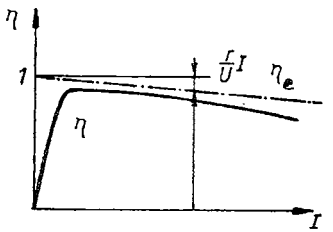



*Fig. 2.10.* Caracteristica randamentului $\eta(I)$ la un motor serie.

Domeniul de folosire al puterii este numai partea ascendentă a curbei, de la $P = 0$ pînă la $P_{max}$.

2.4.6.4. *Caracteristica randamentului* $\eta(I)$. Pentru simplificare făcînd aceeași aproximație $P = P_e = E_c I$ (neglijînd pierderile),

$$\eta = \frac{P}{P_a} = \frac{(U - rI)I}{UI} = 1 - \frac{r}{U} I,$$

a cărei reprezentare grafică rezultă ca în figura 2.10.

În domeniul regimului nominal, randamentul prezintă oarecum un palier avînd valoarea apropiată de cea maximă; în general, la motoarele de tracțiune $\eta_{max}$ are loc în jurul lui 0,75 $I$.

2.4.6.5. *Caracteristica mecanică* $C(n)$. Avînd cunoscute caracteristicile $n(I)$ și $C(I)$, prin eliminarea grafică a variabilei $I$ (prin puncte), rezultă caracteristica $C(n)$.

Alura caracteristicii $C(n)$ se poate deduce și pe cale analitică pornind, pentru simplificare, de la expresia cuplului electromagnetic, în regim nesaturat:

$$C = K\Phi I = KI^2$$

$$E_c = K\Phi n = U - rI = KnI, \text{ de unde } I = \frac{U}{r + Kn} \text{ și } C = K\frac{U^2}{(r + Kn)^2}.$$

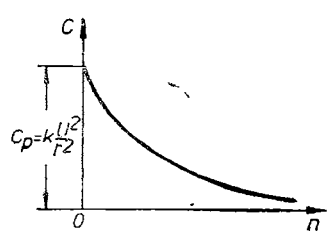



*Fig. 2.11.* Caracteristica mecanică $C(n)$ la un motor serie.

Pentru $n = 0$, $C = K\frac{U^2}{r^2}$ (valoare exagerat de mare)

$$n = \infty, \; C \to 0.$$

Caracteristica mecanică (reprezintă variația a două mărimi mecanice) este reprezentată în figura 2.11.

2.4.6.6. *Caracteristicile la obadă.* Motorul de tracțiune fiind legat prin angrenaj de osia motoare a vehiculului, rezultă că turația motorului devine viteză la obada roții ($V$), iar cuplul devine forță tangențială de tracțiune la obada roții ($F$), adică $n(I)$ devine $V(I)$ și $C(I)$ devine $F(I)$.

Relațiile de transfer la obadă ale mărimilor $n$ și $C$ de la arborele motorului de tracțiune se deduc în mod simplu:

— Viteza de deplasare a locomotivei este egală cu viteza unui punct situat pe periferia roții:

$$V\,[\text{km/h}] = \frac{\pi D n \cdot 60}{1000u} = 0{,}1884\,\frac{D}{u}\,n = Kn. \tag{1}$$

— Din expresia puterii la obadă, rezultă:

$$C\omega\eta_t = F\,\frac{D}{2}\,\omega_1;\quad F[\text{kg}] = \frac{2}{D}\,u\eta_T \cdot C = K_1 C. \tag{2}$$

În relațiile de mai sus s-a notat:

$D$ — diametrul roții motoare, în m;

$u$ — raportul de transmitere al angrenajului;

$\eta_T$ — randamentul angrenajului; pentru calcule practice se poate aproxima $\eta_T = 0{,}97 \cdots 0{,}98$ constant;

$C$ — cuplul la arborele motorului, în kgf.m.

Relația (1) arată că viteza locomotivei este proporțională cu turația motorului, deci curba $n(I)$ este și $V(I)$ la altă scară, este dictată de constanta $K$; relația (2) arată că forța de tracțiune la obadă este proporțională cu cuplul motorului, deci curba $C(I)$ este și $F(I)$ la altă scară dictată de constanta $K_1$.

Caracteristicile la obadă $V(I)$ și $F(I)$ se deduc prin puncte din $n(I)$ și respectiv $C(I)$, cu ajutorul relațiilor (1) și (2).

— Caracteristica $F(I)$ se mai poate deduce și din puterea absorbită de motorul de tracțiune:

$$P_a\,[\text{CP}] = \frac{F[\text{kg}\cdot\text{f}] \cdot V[\text{km/]h}}{270};\quad F = \frac{270\,P}{V}$$

sau

$$F = 0{,}367\,\frac{UI}{V}\,\eta \cdot \eta_T.$$

- $U$ — tensiunea nominală a motorului constantă, în V (pentru $I$, în A se dau valori arbitrare).
- $V$, în km/h rezultă pentru $I$ arbitrari, din caracteristica $V(I)$.
- $\eta$ — randamentul motorului ($0{,}92 \cdots 0{,}94$);
- $\eta_T$ — randamentul angrenajului.

2.4.6.7. *Caracteristica de tracțiune* a vehiculului motor este definită de variația forței de tracțiune la obadă în funcție de viteza vehiculului, adică $F(v)$.

Cunoscînd caracteristicile la obadă $V(I)$ și $F(I)$, prin eliminarea variabilei comune ($I$) rezultă $F(V)$ prin puncte.

Aceeași caracteristică $F(V)$ se obține din caracteristica mecanică $C(n)$ dacă aceasta se cunoaște, prin prelucrarea ei cu relațiile (1) și (2), rezultînd că alura caracteristicii $F(V)$ pentru un motor serie — figura 2.12 este aceeași cu a caracteristicii mecanice $C(n)$.

O asemenea alură a caracteristicii $F(V)$ satisface cerințele unei tracțiunei feroviare, adică la viteze mici locomotiva dezvoltă o forță de tracțiune mare necesară smulgerii și demarării trenului, iar pe măsura creșterii vitezei forța de tracțiune scade, ea fiind necesară în această situație numai pentru învingerea rezistențelor la mers ale trenului.

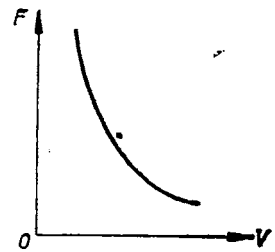


*Fig. 2.12.* Caracteristica de tracțiune $F(V)$ la un motor serie.

**2.4.7. Caracteristicile funcționale ale motorului derivație.** Alura caracteristicii turației $n(I_a)$ rezultă tot din interpretarea relației respective a mașinii de curent continuu, $n = \frac{U - r_a I_a}{K\Phi}$, cu precizarea că $r_a$ și $I_a$ sînt rezistența și respectiv curentul din indus, iar $U$ tensiunea nominală la borne (v. fig. 3, *b*).

La creșterea lui $I_a$ numărătorul expresiei turației scade, deci $n$ scade, pentru un curent de excitație $I_b$ = constant (deci $\Phi$ constant). Datorită reacției indusului, $\Phi$ scade producînd evident o creștere a lui $n$. Obișnuit, la construcțiile normale cu poli auxiliari, influența reacției indusului asupra vitezei este sensibil mai mică decît influența căderii ohmice ($r_a I_a$), așa că $n$ ($I_a$) este o curbă ușor căzătoare cu sarcina motorului, ca în figura 2.13.

Variația turației la regim nominal ($I$), față de turația la mers în gol ($I_0$), practic este de ordinul $\Delta n = \frac{n_0 - n}{n_0} 100 = 2 \ldots 8\%$ de unde proprietatea motorului derivație de a păstra viteza practic constantă cu sarcina; o astfel de caracteristică $n(I)$ specifică motorului derivație (similară și la motorul cu excitație independentă pentru $U$ și $I_e$ constant) este denumită *caracteristică rigidă*, iar motoarele cu o caracteristică asemănătoare se numesc motoare cu *„caracteristică derivație"*. Asemenea motoare se folosesc în acționări unde mecanismul antrenat cere viteză de lucru practic constantă (mașini-unelte...).

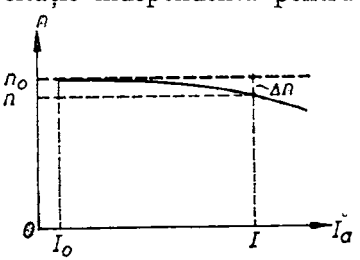


*Fig. 2.13.* Caracteristica turației $n(I_a)$ la un motor derivație

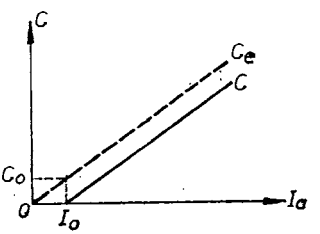


*Fig. 2.14.* Caracteristica cuplului $C(I_a)$ la un motor derivație.

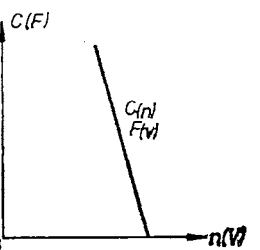


*Fig. 2.15.* Caracteristica mecanică $C(n)$, respectiv caracteristica de tracțiune $F(V)$ la un motor derivație.

*Caracteristica cuplului* $C(I_a)$ pentru $U$ = constant și $I_b$ = constant, se deduce din ecuația cuplului electromagnetic $C_e = K\Phi I_a$ care este o dreaptă (pentru $\Phi$ = constant), ca în figura 2.14. Cuplul la arborele motorului ($C$) se obține din $C_e$ scăzînd cuplul de mers în gol ($C_0$).

*Caracteristica mecanică* $C(n)$ se obține grafic, prin puncte, din $n(I)$ și $C(I)$ prin eliminarea variabilei comune $I$ și rezultă cu aspectul din figura 2.15; aceeași alură are evident și caracteristica de tracțiune $F(V)$.

**2.4.8. Caracteristicile electromecanice universale ale motoarelor de tracțiune de curent continuu.** Pentru calcule preliminare de dimensionare ale unui vehicul motor electric, dacă nu se cunoaște apriori motorul electric și caracteristicile sale, acestea pot fi deduse folosind așa-numitele caracteristici procentuale pe baza cărora se pot calcula și trasa caracteristicile electromecanice ale unui motor pentru care i se pot calcula parametrii nominali din condițiile de remorcare impuse vehiculului motor de proiectat.

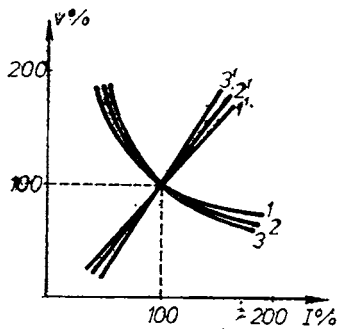


*Fig. 2.16.* Caracteristici $V(I)$ și $F(I)$ pentru trei motoare de aceeași clasă de puteri.

Metoda se bazează pe determinarea caracteristicilor procentuale ale mai multor motoare de tracțiune de aceeași clasă de putere, constatîndu-se faptul că ele nu diferă sensibil. În figura 2.16 s-a reprezentat, pentru trei motoare de tracțiune din aceeași clasă de putere, caracteristica $v(I)$ — curbele *1, 2, 3*, și caracteristica $F(I)$ — curbele *1', 2', 3'*. Toate caracteristicile trec printr-un punct întrucît regimul uniorar a fost luat ca valoare de bază 100%. Pe baza acestor caracteristici se construiește media procentuală a valorilor $v$ și $F$ pentru diferite valori procentuale ale curentului obținîndu-se caracteristicile electromecanice pentru acea clasă de motoare.

Caracteristicile procentuale din figura 2.16 se construiesc după următorul procedeu: valorile nominale (sau uniorare) ale lui $I$, (respectiv $v$), $C$ (respectiv $F$) și ale lui $\eta$ la arbore(sau obadă) se consideră egale cu unitatea (procentual 100%); se dau arbitrar diferite valori lui $I$, pentru care se determină valorile corespunzătoare pentru $v$, $F$, care se raportează la cele de bază determinîndu-se astfel valoarea lor procentuală. De exemplu: considerînd un motor de tracțiune cu parametrii uniorari $I_h = 1250$ A, $F_h = 4730$ kgf, $v_h = 68$ km/h și $\eta_h = 0{,}9$; pentru altă valoare a curentului $I = 1500$ A, se citesc pe caracteristicile motorului $F = 6000$, $v = 63{,}5$ și $\eta = 0{,}89$; la acest nou regim valorile procentuale rezultă pentru curent $\frac{1500}{1250} \cdot 100 = 120\%$, pentru forța de tracțiune $\frac{6000}{4730} \cdot 100 = 126{,}8\%$, pentru viteză $\frac{63{,}5}{68} \cdot 100 = 93{,}5\%$ pentru randament $\frac{0{,}89}{0{,}9} \cdot 100 = 99\%$; dînd altă valoare pentru $I$ se obțin alte valori procentuale ale mărimilor ... rezultînd caracteristicile procentuale ale mărimilor respective pentru motorul în cauză.

În tabelul 2.3 sînt date caracteristicile universale pentru diverse clase de motoare de tracțiune (folosite în U.R.S.S.), iar în tabelul 2.4 randamentul unionar ($\eta_h$) pentru diverse puteri uniorare ($P_h$).

**2.4.9. Funcționarea motorului de tracțiune în condiții impuse de exploatare și raționea alegerii motorului tip serie.** Pentru a evidenția comportarea în exploatare a motorului de tracțiune în scopul sublinierii motivelor ce au stat la baza alegerii tipului, în cele de mai jos se va compara motorul serie cu motorul derivație ambele considerate ca avînd acelaș punct de funcționare la regim nominal, avînd același indus și aceeași carcasă magnetică.

*Tabelul 2.3*

**Caracteristici procentuale universale, la obadă, pentru motoare de tracțiune de diverse clase de puteri**

| | $P_h$ = 20...100 kW (motoare pentru tramvai) | | | $P_h$ = 140... 220 kW (motoare pentru vagon motor) | | | $P_h$ = 300... 550 kW (motoare de locomotive electrice) | | | $P_h$ = 60... 100 kW (motoare slab saturate pentru metrouri) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $I/I_h$ | $v$ % | $F$ % | $n$ % | $v$ % | $F$ % | $r$ % | $v$ % | $F$ % | $r$ % | $v$ % | $F$ % | $r$ % |
| 25 | — | — | — | — | — | — | 174,0 | 13,2 | 91,8 | — | — | — |
| 30 | 180,0 | 14,8 | 88,7 | 200,0 | 12,0 | 80,0 | 157,5 | 18,1 | 95,2 | — | — | — |
| 40 | 147,5 | 25,9 | 95,6 | 160,0 | 22,6 | 90,4 | 137,0 | 28,7 | 98,3 | 187,0 | 18,5 | 84,4 |
| 60 | 121,0 | 49,7 | 100,1 | 126,3 | 46,8 | 98,5 | 116,8 | 51,6 | 100,5 | 135,6 | 43,1 | 97,4 |
| 80 | 108,5 | 74,3 | 100,8 | 109,0 | 73,8 | 100,6 | 106,2 | 75,7 | 100,5 | 112,3 | 71,0 | 99,7 |
| 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 120 | 93,5 | 126,8 | 98,8 | 94,0 | 126,5 | 99,2 | 95,5 | 124,5 | 99,1 | 91,2 | 130,8 | 99,4 |
| 140 | 88,5 | 154,3 | 97,5 | 88,8 | 154,8 | 98,2 | 91,9 | 149,4 | 98,0 | 84,9 | 162,6 | 98,7 |
| 160 | 84,5 | 182,0 | 96,2 | 84,7 | 183,5 | 97,2 | 88,0 | 176,0 | 96,8 | 80,3 | 194,2 | 97,7 |
| 180 | 81,0 | 210,7 | 94,8 | 81,3 | 212,6 | 95,9 | 85,0 | 202,0 | 95,4 | 76,6 | 226,2 | 96,3 |
| 200 | 78,5 | 238,0 | 93,5 | 78,2 | 241,7 | 94,6 | 81,8 | 229,8 | 94,0 | 73,8 | 257,0 | 94,8 |

*Tabelul 2.4*

**Randament, la regim uniorar, pentru motoare de tracțiune**

| Puterea uniorară, kW ($P_h$) | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 140 | 160 | 220 | 300 | 400 | 500 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Randamentul ($\eta_h$) | 0,850 | 0,867 | 0,875 | 0,880 | 0,883 | 0,885 | 0,888 | 0,891 | 0,894 | 0,900 | 0,905 |

2.4.9.1. *Variația curentului absorbit, la o variație de cuplu.* În exploatare, cuplul motorului are variații mari și la intervale de timp mici, după profilul liniei, tonajul remorcat și regimul de circulație.

În figura 2.17 s-a trasat curba $C(I)$ pentru cele două motoare. Se constată că în domeniul valorilor mari ale curentului (la dreapta verticalei $y - y'$) cum este cazul mai frecvent cînd locomotiva lucrează cu forțe de tracțiune importante, pentru o variație a cuplului $\Delta C$ ; variația curentului absorbit de motorul serie ($\Delta I_{MS}$) este mai mică decît în cazul motorului derivație ($\Delta I_{MD}$).

La aceeași concluzie se ajunge scriind și variațiile relative ale cuplului pentru cele două motoare:

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta \Phi}{\Phi} \qquad \text{(pentru motorul serie)}$$

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{\Delta I}{I} \qquad \text{(pentru motorul derivație)}$$

La motorul serie cuplul depinde de curent și flux (V.4.6—2), iar la motorul derivație cuplul depinde numai de curent; în cazul motorului serie la o variație relativă a cuplului, variația relativă a intensității va fi mai mică (nu aproximativ proporțională cu variația cuplului ca în cazul motorului derivație) din cauza sporirii corespunzătoare și a fluxului.

Această proprietate a motorului serie are repercusiuni favorabile asupra limitării suprasarcinilor la substații și a căderilor de tensiune în linia de contact.

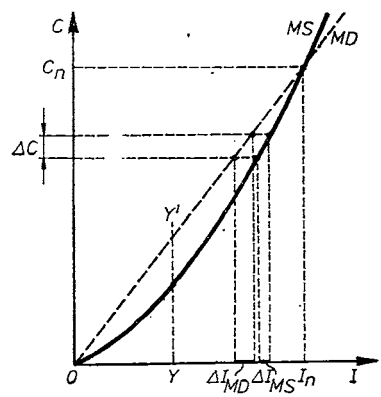



*Fig. 2.17.* Variația curentului absorbit ($\Delta I$) la o variație de cuplu ($\Delta C$), pentru motorul serie ($MS$) și motorul derivație ($MD$).

2.4.9.2. *Efectul inegalității diametrului roților motoare.* Este știut că diametrele roților unei locomotive nu se uzează toate riguros la fel. O diferență a diametrelor roților afectează caracteristica de tracțiune a unei osii motoare, sau este același lucru cu a considera diametrele egale însă diferențe între caracteristicile mecanice ale motoarelor celor două osii. În figura 2.18 s-a trasat caracteristica $F(V)$ pentru motorul serie și respectiv derivație la o variație a diametrului roții motoare (aceasta conduce la abaterea caracteristicilor).

Cum viteza tuturor osiilor motoare este însă aceeași (viteza locomotivei este una singură), rezultă o variație a forței de tracțiune pentru motorul derivație ($\Delta F_{MD}$) incomparabil mai mare ca pentru motorul serie ($\Delta F_{MS}$) și deci sarcina între motoarele serie se repartizează în mod acceptabil în exploatare.

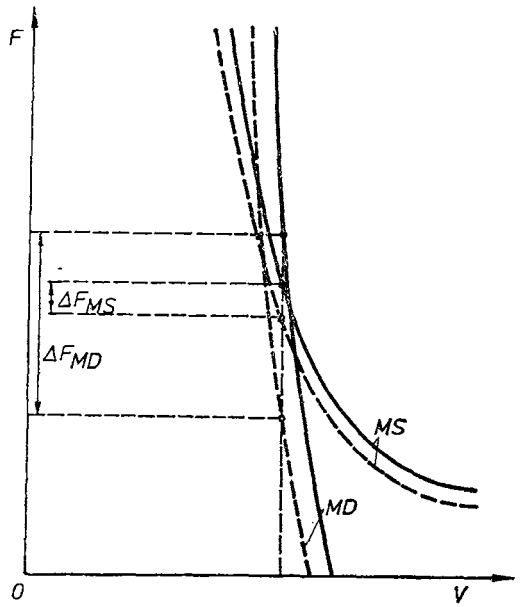



*Fig. 2.18.* Variația forței de tracțiune ($\Delta F$) în funcție de variația diametrului roții motoare, pentru motorul serie și motorul derivație.

2.4.9.3. *Efectul variației tensiunii în linia de contact.* În mod obișnuit tensiunea în linia de contact variază în funcție de numărul trenurilor pe zona fider respectivă, de poziția trenului față de substație, de tensiunea din sistem... Pentru buna funcționare a locomotivei și dimensionarea echipamentelor, normele *UIC* — fișa 610-0 reglementează variațiile limită de tensiune din linia de contact ca în tabelul 2.5.

În regim normal de exploatare variațiile de tensiune sînt line; cînd pantograful se desprinde de pe firul de contact ($U_{LC} = 0$) și se reprinde ($U_{LC} = U_{nominal}$) variația este bruscă și avem un regim tranzitoriu de funcționare.

Dacă tensiunea prezintă o creștere relativă $\frac{\Delta U}{U}$ și intensitatea va avea o creștere relativă $\frac{\Delta I}{I}$.

În cazul motorului derivație, amperspirele de excitație sînt proporționale cu tensiunea, iar în cazul motorului serie ele sînt proporționale, evident, cu intensitatea din indus. În ambele cazuri însă, $E_c$ va crește mai puțin repede

*Tabelul 2.5*

**Tensiunea nominală și variațiile limită admise**

| Sistem de electrificare | Tensiunea, V | | | Frecvența nominală a rețelei |
|---|---|---|---|---|
| | minimă | nominală | maximă | |
| Curent continuu ····· | 500 | 750 | 900 | — |
| | 1 000 | 1 500 | 1 800 | — |
| | 2 000 | 3 000 | 3 600 | — |
| Curent monofazat | 12 000 | 15 000 | 16 500 | 16 2/3 Hz |
| | 19 000 | 25 000 | 27 500 | 50 Hz |

decît amperspirele din cauza saturației, lucru ce se va evidenția considerînd că sporirea relativă $\frac{\Delta E_c}{E}$ este egală cu sporirea relativă a amperspirelor multiplicată cu un factor mai mic decît unitatea $(1 - \alpha)$.

Pentru motorul derivație, se poate scrie:

$$\frac{E_c}{E_c} = (1 - \alpha)\frac{\Delta U}{U}.$$

Pentru motorul serie, rezultă:

$$\frac{\Delta E_c}{E_c} = (1 - \alpha)\frac{\Delta I}{I}.$$

Pentru ambele motoare:

$$U - E_c = r \cdot I;$$

$$\Delta U - \Delta E_c = r \cdot \Delta I;$$

$$\Delta U - \Delta E_c = (U - E_c)\frac{\Delta I}{I}. \tag{49}$$

În cazul motorului derivație, relația (49) devine:

$$\Delta U - (1 - \alpha)E_c\frac{\Delta U}{U} = (U - E_c)\frac{\Delta I}{I};$$

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{\Delta U}{U}\left(1 + \frac{\alpha E_c}{U - E_c}\right). \tag{50}$$

În cazul motorului serie, relația (49) devine:

$$\Delta U - (1 - \alpha)E_c\frac{\Delta I}{I} = (U - E_c)\frac{\Delta I}{I}$$

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{\Delta U}{U}\frac{1}{1 - \alpha\frac{E_c}{U}}. \tag{51}$$

Pentru a putea trage o concluzie comparativă asupra relațiilor (50) și (51), să presupunem cazul concret al unei pierderi ohmice în motor de 3%, la care $\frac{E_c}{U} = 0{,}97$, $\frac{E_c}{U - E_c} = 32{,}2$ și $\alpha = 0{,}5$.

Se obține:

— pentru motorul serie $\frac{\Delta I}{I} = 1{,}94\frac{\Delta U}{U}$;

— pentru motorul derivație $\frac{\Delta I}{I} = 17\frac{\Delta U}{U}$.

Aceste creșteri relative conduc la valori absolute ale curentului de circa 8 ... 9 ori mai mare în cazul motorului derivație.

Creșterea bruscă a tensiunii conduce la creșterea bruscă a curentului indusului motorului de tracțiune deoarece datorită inerției mari a trenului viteza lui nu poate crește brusc și t.c.e.m. necesară echilibrării tensiunii aplicate nu poate fi dezvoltată imediat de motor.

În concluzie, o variație a tensiunii în linia de contact atrage o variație a curentului absorbit incomparabil mai mică în motorul serie decît în motorul derivație. Acest lucru reprezintă un avantaj incontestabil pentru utilizarea motorului serie în tracțiune, întrucît riscurile de agravare a comutației la variația bruscă a tensiunii în linia de contact sînt mai mici.

2.4.9.4. *Elasticitatea mai mare în exploatare și utilizarea mai bună a motorului serie.* Considerînd caracteristica de tracțiune pentru cazul motorului serie și derivație și trasînd rezistența totală pentru un tren greu $Q(V)$ și un tren ușor $Q'(V)$ pe aceeași rampă $^0/_{00}$ (fig. 2.19) se observă că motorul serie

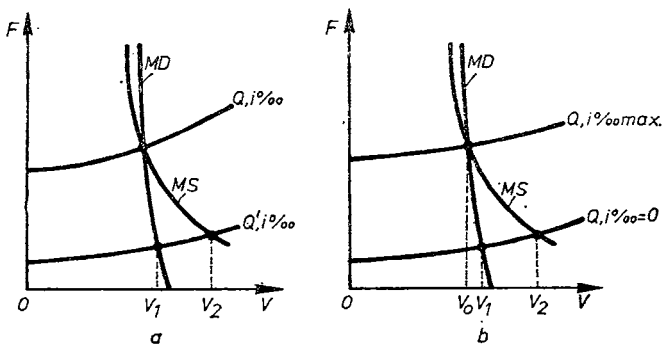



*Fig. 2.19.* Elasticitatea și utilizarea în exploatare a motorului serie și derivație în funcție de tonaj ($Q$) și profil ($i$ ‰0).

este apt să remorcheze trenurile ușoare cu viteză mare și cele grele cu viteză mai redusă.

Pentru situația cînd tonajul este același $Q$ însă profilul liniei variază (fig. 2.19, *b* — cazul real în exploatare), rezultă vitezele medii,

$$V_{m(MS)} = \frac{V_2 + V_0}{2};\ V_{m(MD)} = \frac{V_1 + V_0}{2};\ V_{m(MS)} > V_{m(MD)},$$

adică viteza medie corespunzătoare motorului serie este mai mare decît pentru motorul derivație.

2.4.10. **Stabilitatea electrică în funcționare a motorului serie.** Ecuația de echilibru a tensiunii, în regim stabil de funcționare este:

$$U = E_c + rI = K\Phi v + rI. \qquad (1)$$

În exploatare, motorul de pe locomotivă este obligat să demareze, să treacă de la o treaptă de viteză la alta, interconectări între motoare ... adică

este supus regimurilor tranzitorii, iar ecuația tensiunii în regim tranzitoriu devine:

$$U = K\Phi v + rI + L\frac{dI}{dt}. \qquad (2)$$

$L\frac{dI}{dt}$ este tensiunea electromotoare de autoinducție produsă de variația lui $I$ pe durata procesului tranzitoriu; $L$ — inductanța circuitului indusului care poate fi considerată practic constantă.

Se zice că motorul funcționează electric stabil, dacă are proprietatea de a reveni automat la regimul electric stabil (satisfacerea ecuației 1 pentru tensiune), ori de cîte ori este obligat să treacă printr-un proces tranzitoriu (ecuația 2). De aici rezultă și condiția stabilității electrice: ori de cîte ori sarcina deviază în sens crescător ($I + \Delta I$), în mod automat în circuit trebuie să apară o reacție de semn contrar care să tragă curentul la valoarea inițială (condiția este $\frac{dI}{dt} > 0$; derivata indică variația curentului); cînd $I$ deviază în sens descrescător ($I - \Delta I$), reacția va trebui să fie pozitivă $\left(\frac{dI}{dt} > 0\right)$.

Reprezentînd grafic ecuația (2), pentru motorul serie, pusă sub forma:

$$L \cdot \frac{dI}{dt} = (U - rI) - K\Phi v,$$

rezultă diagrama din figura 2.20 (curba $K\Phi v$ are aspectul curbei de magnetizare, fiind vorba de motorul serie).

Condiția de stabilitate devine $\frac{d}{dI}\left(L\frac{dI}{dt}\right) < 0$, sau

$$\frac{d}{dI}(U - rI - K\Phi v) < 0;\ d\left(\frac{U - rI}{dI}\right) < \frac{d(K\Phi v)}{dI};\ \frac{dU}{dI} < \frac{d(K\Phi v + rI)}{dI},$$

adică la devierea curentului în sens crescător, este necesar ca suma $E_c = K\Phi v$ și $rI$ să crească mai repede decît tensiunea aplicată la bornele motorului.

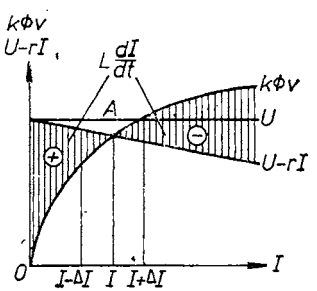


*Fig. 2.20.* Stabilitatea electrică în funcționare, a motorului serie.

Punctul $A$ este cel stabilit de funcționare, întrucît $\left(I = \text{constant, deci } L\frac{dI}{dt} = 0\right)$ satisface ecuația (1); suprafețele haşurate reprezintă termenul $L\frac{dI}{dt}$, iar semnul fiind al derivatei indică sensul reacției ce apare în circuit. Rezultă că motorul serie îndeplinește condițiile funcționării stabile din punct de vedere electric.

O examinare similară a celorlalte tipuri de motoare conduce la concluziile că: motorul anticompund este instabil din punct de vedere electric;

motorul compund este stabil; motoarele derivație și cu excitație separată sînt stabile electric în zona sarcinilor uzuale (pînă la curentul nominal) și instabile în zona sarcinilor foarte mari.

2.4.11. **Stabilitatea mecanică în funcționare a motorului serie.** Proprietatea motorului de a tinde automat spre starea de echilibru dinamic între cuplul motor (respectiv forța de tracțiune creată la obadă) și cuplul rezistent (rezistența totală a trenului) constituie stabilitatea mecanică.

Ecuația de mișcare a trenului, în regim de tracțiune este:

$$F - W = m(1 + \gamma)\frac{dv}{dt}; \tag{1}$$

$F$ este forța de tracțiune la obadă;
$W$ — rezistența totală la înaintare a trenului, $W = G(a + bV + cV^2)$;
$m$ — masa trenului;
$\gamma$ — coeficient de echivalare a maselor în mișcarea de rotație;
$\frac{dv}{dt} = a$ — accelerația trenului.

Regimul stabil (echilibru dinamic) are loc la mișcarea trenului cu viteză constantă, deci $a = \frac{dv}{dt} = 0$, ecuația de mișcare devine:

$$F - W = 0 \tag{2}$$

și cele două cupluri se egalează (al motorului și al organului antrenat — osia).

Cînd viteza crește $(V + \Delta V)$, cuplul rezistent $(W)$ crește, iar forța de tracțiune va trebui să scadă (curba $F$ să se situeaze sub curba $W$), cu alte cuvinte rezultă condiția de stabilitate mecanică:

$$\frac{dv}{dt} < 0;\ \frac{d}{dv}\left[m(1+\gamma)\frac{dv}{dt}\right] < 0;\ \frac{d}{dv}(F - W) < 0$$

sau,

$$\frac{dF}{dv} < \frac{dW}{dv}. \tag{3}$$

Pentru o scădere a vitezei $(V - \Delta V)$ procesul de mai sus trebuie să se petreacă în sens invers.

Condiția de stabilitate mecanică (3) cere ca la o creștere a vitezei (cînd $W$ crește) forței de tracțiune $(F)$ să-i corespundă o micșorare sub valoarea lui $W$ și invers la o scădere a vitezei (cînd $W$ scade) forței de tracțiune să-i corespundă o creștere peste valoarea lui $W$.

Reprezentînd o caracteristică de tracțiune $F(V)$ corespunzătoare unui motor serie, dedusă deci din $Cm$ și rezistența de mers a vehiculului $W$ (deci cuplul rezistent), ca în diagrama din figura 2.21 rezultă că motorul serie prezintă și stabilitatea mecanică.

Punctul $A$ este un punct stabil din punct de vedere al stabilității mecanice; $V$ este viteza de echilibru și deci $F - W = 0$ (condiția 2).

Suprafețele haşurate reprezintă forța acceleratoare $m(1+\gamma)\frac{dv}{dt}$ iar semnul este semnul derivatei $\frac{dv}{dt} = a$, întrucît $m(1+\gamma)$ este un termen constant.

La scăderea vitezei, punctul $V - \Delta V$, pe arborele motorului apare un cuplu dinamic pozitiv $\left(\text{semnul derivatei } \frac{dv}{dt} > 0\right) C_J = J\frac{d\Omega}{dt}$ reprezentat pe figură prin segmentul $c - d$ sub acțiunea căruia viteza crește (este trasă în $V$ — punctul $A$ stabil). Dacă viteza crește $(V + \Delta V)$ cuplul dinamic devine negativ (segmentul $a - b$) și fenomenul se petrece invers. $J$ este momentul de inerție al ansamblului maselor în mișcare de rotație legate de rotorul motorului (rotor — angrenaj-osie).

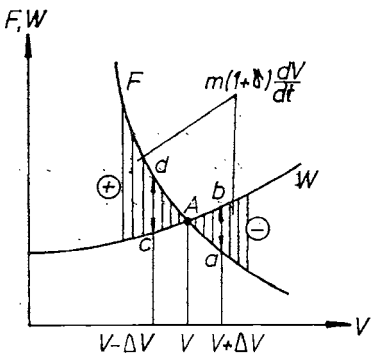


*Fig. 2.21.* Stabilitatea mecanică în funcționare, a motorului serie.

Pentru celelalte tipuri de motoare, cu privire la stabilitatea mecanică a funcționării, sînt valabile aceleași concluzii ca la stabilitatea electrică.

2.4.12. **Mărimi caracteristice motoarelor serie de tracțiune.**

Motoarele serie de tracțiune sînt caracterizate prin următoarele mărimi:

— Diametrul indusului, $0{,}5 < D < 1$ m; valoarea 1,5 m este un maxim impus de gabaritul motorului pe o locomotivă.

— Lungimea indusului, $0{,}2 < L < 0{,}5$ m; valoarea $L$ este limitată de inducție ($B$) și viteza periferică a indusului ($V_i$) în scopul obținerii unei tensiuni de reactanță convenabilă.

— Viteza lineară a indusului, $V_i = \pi D n_{max}$, este limitată din considerente mecanice la 90 m/sec; la regimul nominal $V_i = \pi D n$ cu valori practice 20 ... 45 m/sec.

— Viteza lineară a colectorului, $V_K = \pi D_K n$ cu valori maxime limitate la 55...60 m/sec din motive mecanice (contactul corect perie-colector este cu atît mai dificil cu cît $V_K$ este mai mare) și din motive de comutație (timpul de comutație descrește cînd $V_K$ crește și comutația se agravează). La regim nominal $V_K = 15 \ldots 30$ m/s.

— Tensiunea medie între lamelele colectorului, $e = \frac{2pU}{l}$ ($l$ — numărul total de lamele ale colectorului), $12 < e < 20$V.

— Densitatea de curent în conductorii indusului, $\delta = \frac{I_a}{s}$ ($s$ — secțiunea conductorului, în mm²), $\delta = 7 \ldots 8$ A/mm² pentru motoarele ventilate forțat și $\delta = 5 \ldots 6$ A/mm² pentru motoarele autoventilate.

— Numărul de poli $2p = 4, 6, 8$ cu puterea pe pol, $P_p = \frac{P}{2p}$, limitată la 200 ... 250 kW.

— Raportul turațiilor, $K' = \frac{n}{n_{max}}$; $0{,}35 < K' < 0{,}60$ ($n$ — turația nominală, $n_{max}$ — turația maximală).

— Greutatea specifică a motorului depinde de produsul $DL$ (reprezintă aproximativ volumul indusului) însă nu este direct proporțională cu acest produs din cauza greutății părții fixe. Pentru construcțiile actuale se pot admite valorile de mai jos în funcție de numărul de poli $2p$:

$2p = 4$ . . . . . $g$[kgf/kW] = 1,15
6 . . . . . 1
8 . . . . . 0,85 ... 0,90
10 . . . . . 0,80 ... 0,85

— Variația greutății cu tensiunea, pentru aceeași putere $P$ și turație $n$, raportul greutăților motorului sub tensiunea $U_1$ și respectiv $U_2$ este de ordinul

$$\frac{Q_1}{Q_2} = 1 + 0{,}00036(U_1 - U_2) \quad (U_1 \text{ și } U_2 \text{ în volți})$$

— Greutatea unui motor de putere $P$ dată, crește cu cît raportul $K' = \frac{n}{n_{max}}$ scade.

## 2.5. REGLAREA VITEZEI

**2.5.1. Necesitatea reglării vitezei și metode de reglare.** În cazul unei locomotive de curent continuu înzestrată cu motor serie, așa cum s-a menționat, pentru tensiunea nominală $U$ la bornele motorului, locomotiva dispune de o singură caracteristică de tracțiune limitată după $V_{max}$ (corespunzător turației maxime a motorului) și $F_{max}$ (corespunzător curentului maxim din motor). Or, în regim de exploatare o locomotivă este supusă la o varietate de regimuri funcționale începînd cu $V = 0$ (la demaraj) sau $F_{min}$ în cazul cînd locomotiva circulă izolat, situații ce nu pot fi rezolvate în nici un caz dispunînd numai de o caracteristică de tracțiune (fig. 2.22).

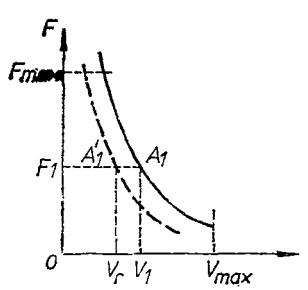


*Fig. 2.22.* Dificultățile reglării vitezei pentru cazul unei singure caracteristici de tracțiune.

La demaraj, pentru $V = 0$ rezultă $F \to \infty$ (deci un curent inadmisibil pe motor); circulînd pe un profil dat cu un tonaj dat și presupunînd $A_1$ un punct stabil de funcționare (caracterizat prin $V_1$, $F_1$), dacă apare o restricție de viteza ($V_r$) care necesită tot forța de tracțiune $F_1$, punctul $A_1$ va trebui să treacă în

$A_1'$ ($V_r$, $F_1$) ceea ce implică existența unei alte caracteristici de tracțiune (figurată punctat). Rezultă necesitatea imperioasă că o locomotivă trebuie să dispună de un număr cît mai mare de caracteristici de tracțiune pentru a face față cerințelor exploatării; ideal ar fi dacă planul $FOV$ limitat de caracteristica $F(V)$ a regimului nominal să conțină o infinitate de caracteristici $F(V)$, adică să avem un reglaj continuu.

Motorul serie, datorită alurii caracteristicii sale mecanice $C(n)$, respectiv $F(V)$ are proprietatea intrinsecă de a-și regla viteza în mod automat în funcție de cuplul rezistent, fără nici o intervenție din exterior asupra circuitelor electrice; *se autoreglează* cînd funcționează pe o caracteristică dată (punctul $A_1$ se plimbă automat de-a lungul întregii caracteristici trasată plin).

Mai există însă și al doilea mod de a regla viteza, printr-o *reglare comandată*, adică realizarea de alte caracteristici prin intervenție voită în circuitele electrice; pe fiecare caracteristică în parte, proprietatea de autoreglare însă se menține.

Diversele caracteristici $F(V)$ obținute se mai numesc în mod curent : „treaptă de viteză", „treaptă de reglare", „poziție de mers" ..., fiecăruia în parte corespunzîndu-i un domeniu propriu de reglare al vitezei.

Din ecuația vitezei motorului serie, $v = \dfrac{U - (r + R)I}{K\Phi}$, $I$ fiind variabila independentă impusă de condițiile de tracțiune, $K$, $r$ — constante, rezultă posibilitățile de reglare a vitezei:

— prin variația tensiunii $U$ la bornele motorului;

— prin variația fluxului inductor;

— prin variația rezistenței $R$ înseriată în circuitul motorului.

La vehiculele motoare electrice de curent continuu se folosesc toate trei metodele.

2.5.2. **Reglarea vitezei prin variația tensiunii la bornele motorului de tracțiune.** La locomotivele directe, tensiunea de la linia de contact se aplică la motoarele de tracțiune. Variația tensiunii pe motor se poate obține numai prin interconectarea diversă a motoarelor de tracțiune; de aici și rațiunea că locomotiva de curent continuu trebuie să dispună de un număr par de motoare (4, 6, 8).

Pentru o locomotivă, spre exemplu, cu șase motoare de tracțiune și 3 kV la linia de contact, sînt posibile conexiunile: serie (rezultînd $U_1 = 500$ V pe motor); serie-paralel 1 (două ramuri în paralel, fiecare ramură cu trei motoare în serie, rezultînd $U_2 = 1000$ V pe motor); serie-paralel 2 (trei ramuri în paralel, fiecare ramură cu două motoare în serie, rezultînd $U_3 = 1\,500$ V pe motor). Această ultimă conexiune mai este denumită impropriu și conexiune paralel. Dispoziția schematică este reprezentată în figura 2.23.

Trecerea de la o conexiune la alta trebuie făcută obligatoriu fără întreruperea curentului în circuitul principal de forță, întrucît aceasta ar conduce la întreruperea forței de tracțiune în perioada de trecere și deci la apariția variațiilor bruște ale acesteia, cu consecințe defavorabile asupra cîrligului de tracțiune și fără aplicarea unui salt de tensiune prea mare pe motor.

În mod uzual, se practică două metode de trecere:

— trecerea prin scurtcircuit (metoda șunt);

— trecerea prin punte.

2.5.2.1. *Trecerea de la o conexiune la alta prin metoda scurtcircuit.* Metoda constă în a scurtcircuita o parte din motoare pe un șunt care asigură continuitatea curentului, după care se execută legăturile necesare pentru trecerea la conexiunea următoare. Principiul metodei este indicat în figura 2.24.

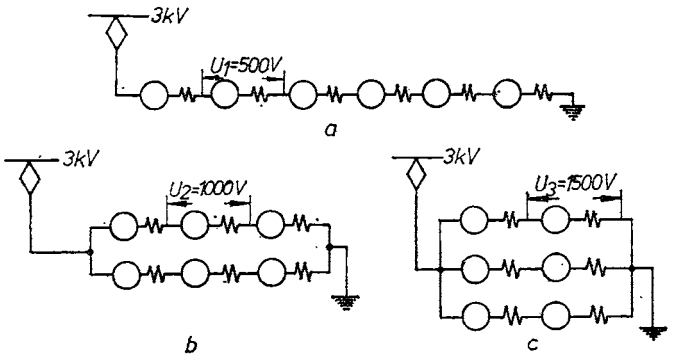



*Fig. 2.23.* Schema conectării a șase motoare serie sub 3kV : *a* — conexiunea serie ; *b* — — conexiunea serie-paralel *1* ; *c* — conexiunea serie-paralel *2* (impropriu paralel).

O primă ameliorare a trecerii constă în a deconecta numai jumătate din motoare. Pentru simplificare în figura 2.24 s-a considerat cazul a două motoare conectate în serie, cu tot reostatul eliminat din circuit — poziția *s* (punc-

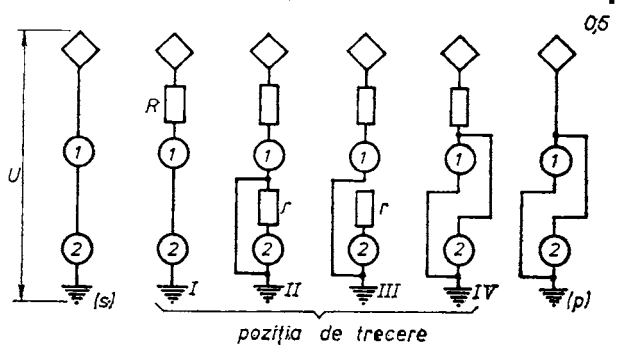



*Fig. 2.24.* Schema trecerii de la conexiunea serie la paralel prin metoda scurtcircuit, pentru cazul a două motoare.

tul $M_0$ de funcționare pe caracteristica $F(V)$ corespunzătoare tensiunii $U/2$ pe motor — figura 2.26).

Pînă se ajunge la conexiunea paralel a motoarelor cu $U$ pe motor sînt necesare poziții intermediare de trecere cu înseriere de reostat în circuit,

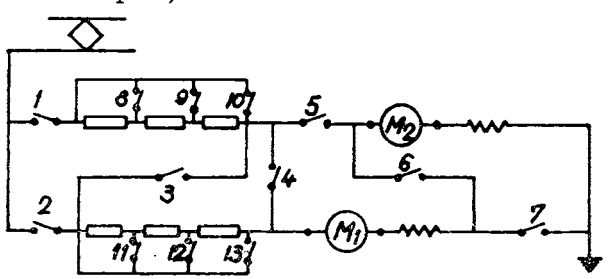



*Fig. 2.25.* Schema de conexiuni pentru trecerea serie la paralel, în cazul a două motoare (corespunzătoare fig. 2.24).

pentru a nu se aplica brusc saltul de tensiune pe motoare de la $U/2$ (conexiunea serie) la $U$ (conexiunea paralel). Pozițiile intermediare de trecere și modul cum se deplasează punctul de funcționare rezultă din figurile 2.24 și 2.26.

— Poziția *I* de trecere, cu înserierea reostatului *R*, cînd tensiunea pe motoare fiind sub *U*/2, punctul de funcționare va fi $M_1$ pe o caracteristică serie cu reostat (*s* cu *R*).

— Poziția *II* de trecere, se scurtcircuitează motorul *2* care se rotește în gol; motorul *1* este sub tensiunea *U* cu *R* în circuit, iar punctul de funcționare va fi în $M_2$. La această poziție de trecere $M_2$ se scurtcircuitează pe o rezistență *r* care are drept efect limitarea curentului de scurtcircuit și diminuarea comutației.

— Poziția *III* de trecere, deconectarea lui $M_2$ care conduce la o situație funcțională similară cu poziția *II* — *F* este același și deci punctul de funcționare $M_3$ va fi același cu $M_2$.

— Poziția *IV* cu ambele motoare în paralel și *R* în circuit; punctul de funcționare va fi în $M_4$ pe o caracteristică paralel cu reostat (*p* cu *R*).

— Eliminînd pe *R* se ajunge la conexiunea paralel (*p*) fără reostat.

În mod practic trecerea de la o conexiune la alta se face în timp foarte scurt de aceea se poate considera că viteza vehiculului *V* rămîne aceeași.

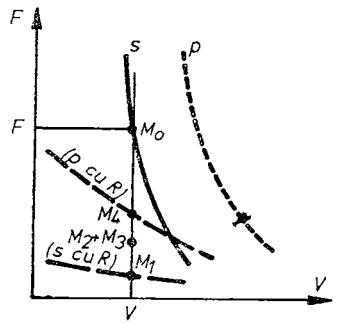



*Fig. 2.26.* Diagrama de funcționare în cazul tecerii de la conexiunea serie la paralel prin metoda scurtcircuit, pentru cazul a două motoare.

Trecerea de la o conexiune la alta se face utilizînd contactoare care lucrează într-o anume succesiune. În figura 2.25 este refăcută schema din figura 2.24, cu indicarea contactoarelor necesare, iar în tabelul 2.6 ordinea de lucru a contactoarelor.

În schema de principiu din figura 2.3 s-a figurat poziția și numărul necesar de contactoare pentru efectuarea conexiunilor serie, serie-paralel și paralel cu cele patru motoare. Ordinea de lucru a contactoarelor pentru această schemă este redată în tabelul 2.1.

2.5.2.2. *Metoda punte, pentru trecerea de la o conexiune la alta* (figura 2.27). La sfîrșitul conexiunii serie, se șuntează fiecare motor pe o rezistență *R*. Prin motoare va trece curentul $I_1$, iar prin ramura cu rezistențe curentul $I_2 = \frac{U}{2R}$. Puntea *AB* va fi străbătută de curentul $I_1 - I_2$; *R* se calculează astfel ca $I_1 \simeq I_2$ și deci la deconectarea punții (se deschide contactorul *K*) are loc tranziția de la conexiunea serie la paralel, fără șoc de curent.

Pentru realizarea schemei de tranziție prin metoda punte se folosesc de asemenea contactoare, ca și la metoda de trecere prin scurtcircuit, însă rezultă contactoare mai numeroase.

Un alt dezavantaj al metodei constă în eliminarea disimetrică a reostatului la cuplajul paralel pînă se ajunge la conectarea paralel fără reostat. Acest neajuns este impus din însăși schema unde se observă că reostatul se împarte în cele două ramuri, dintre care pe ramura unui motor este plasat spre catenară, iar pe ramura celuilalt motor reostatul este plasat spre pămînt.

Metoda punte se folosește de obicei la vehicule motoare de putere mai mică (tramvai, metrou) avînd avantajul unui șoc de curent mai redus (v. fig. 2.27, *b*).

*Tabelul 2.6*

**Contactoarele și ordinea de lucru pentru schema din figura 2.25**

| Conexiunea | | Contactorul nr. | | | | | | | Observații |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7–12 | |
| Serie fără reostat | . . . | — | ● | — | — | ● | — | — | ● contactor închis — contactor deschis s |
| Poziția de trecere | I | ● | — | ● | — | ● | — | — | ș cu R |
| | II | ● | ● | — | — | ● | ● | — | $M_2$ șuntat |
| | III | ● | ● | — | — | — | ● | — | $M_2$ decontat |
| | IV | ● | ● | — | ● | — | ● | — | p cu R |
| Paralel fără reostat | ... | ● | — | ● | — | ● | ● | ● | p |

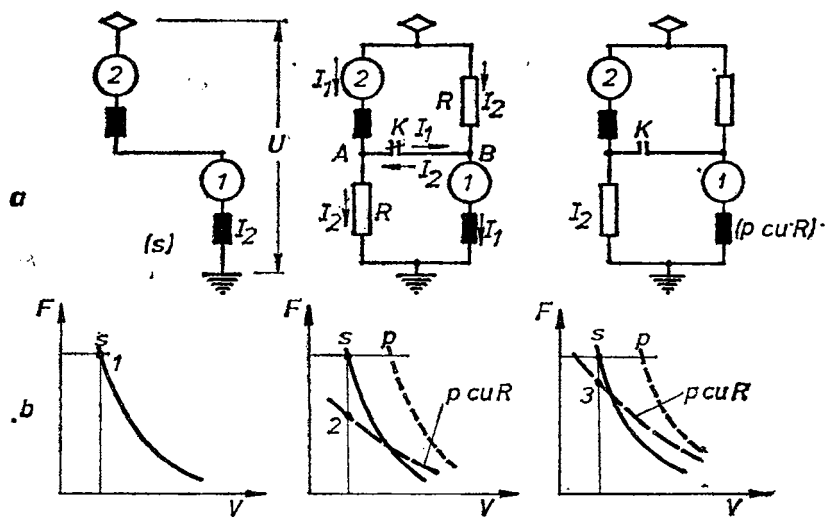



*Fig. 2.27.* Metoda punte, pentru interconectarea motoarelor: *a*—schema de conexiuni; *b* — diagramele de funcționare corespunzătoare.

2.5.2.3. *Caracteristica $V(I)$ pentru diverse tensiuni la bornele motorului.* Cunoscînd caracteristica $V(I)$ a unui motor serie, pentru tensiunea nominală $U$, se poate calcula și trasa $v(I)$ pentru oricare altă tensiune conform relației:

$$v = \frac{U - rI}{K\Phi} \text{ (în această relație } U \text{ este cea nominală).} \qquad (1)$$

Pentru tensiunea $U_1$ și același $I$ rezultă:

$$v_1 = \frac{U_1 - rI}{K\Phi}. \tag{2}$$

Din relațiile (1) și (2), $\frac{v_1}{v} = \frac{U_1 - rI}{U - rI}$, $v_1 = v\frac{U_1 - rI}{U - rI}$. (3)

Relația (3) servește la trasarea, prin puncte (pentru $I$ arbitrar ales), a caracteristicii $v_1(I)$ pentru $U_1$, din caracteristica $v(I)$ pentru $U$ (nominal) cunoscută.

Pentru calcule practice, neglijînd $rI$ în raport cu $U$ rezultă:

$$v_1 \simeq v\frac{U_1}{U}, \tag{4}$$

adică ordonata $v_1$ pentru un $I$ dat se obține multiplicînd ordonata corespunzătoare $v$ cu raportul tensiunilor $\frac{U_1}{U}$.

În cazul unei locomotive la care se efectuează cu motoarele de tracțiune conexiunile serie, serie-paralel și paralel și se cunoaște $v(I)$ pentru $U$ corespunzător conexiunii paralel, caracteristicile pentru conexiunea serie ($U_s$) și conexiunea serie-paralel ($U_{s-p}$) se trasează prin puncte folosind relația (3) dacă se cunoaște $r$ al motorului, sau cu relația (4) mai aproximativă.

În figura 2.28 s-a indicat modul de trasare al caracteristicilor $v(I)$ pentru conexiunea serie și serie-paralel din $v(I)$ pentru tensiunea nominală $U$ corespunzătoare conexiunii paralel (s-a indicat construcția pentru un punct $A$).

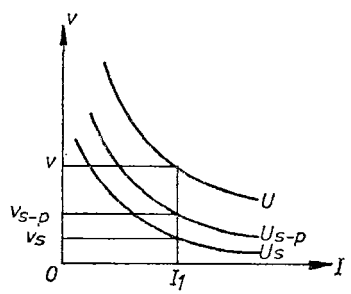



*Fig. 2.28.* Caracteristicile $v(I)$ pentru diverse tensiuni rezultate din interconectarea motoarelor.

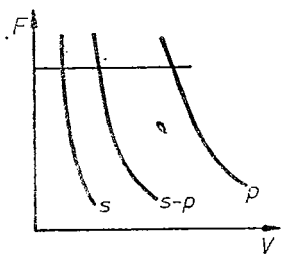



*Fig. 2.29.* Caracteristicile de tracțiune aferente tensiunilor rezultate din interconectarea motoarelor.

Aceste trei caracteristici combinate cu caracteristica $C(I)$ a motorului (aceasta este numai una, ea nedepinzînd de tensiune, $C = K\Phi I$) rezultă trei caracteristici $F(V)$ corespunzător celor trei conectări ale motoarelor (fig. 2.29).

Dacă este vorba de o locomotivă cu șase motoare la $U_{LC} = 1{,}5$ kV vor rezulta conectările serie cu tensiunea pe motor $U_s = \frac{1{,}5}{6} = 0{,}25$ kV, serie-paralel 1 cu $U_{s-p} = \frac{1{,}5}{3} = 0{,}5$ kV, serie-paralel 2 cu $U_{s-p} = \frac{1{,}5}{2} = 0{,}75$ kV și paralel cu $U_p = 1{,}5$ kV care conduc în final la patru caracteristici $F(V)$.

2.5.3. **Reglarea vitezei prin variația fluxului inductor.** Reducerea fluxului inductor se caracterizează prin raportul dintre forța magnetomotoare de excitație în cîmp redus $AW_{CR}$ și forța magnetomotoare în cîmp plin $AW_{CP}$, pentru același curent în rotor; acest raport definește coeficientul de reducere al cîmpului (de șuntare, sau coeficientul de reglaj al excitației $\beta$), adică

$$\beta = \frac{AW_{CR}}{AW_{CP}}. \tag{1}$$

Zicem că motorul funcționează la cîmp plin, atunci cînd întregul curent din indus parcurge toate spirele înfășurării de excitație.

Coeficientul $\beta$ se exprimă de obicei în % și nu corespunde totdeauna gradului de slăbire a fluxului de excitație al motorului, așa cum exprimă relația 1, adică gradului de slăbire a forței magnetomotoare a înfășurării de excitație.

La electromotorul cu circuitul magnetic saturat, fluxul magnetic slăbește într-o măsură mai mică.

Dacă se trasează curba de magnetizare (curba *1*, fig. 2.30) și dacă se notează forțele magnetomotoare $AW_{CR}$, $AW_{CP}$ ale înfășurării de excitație, precum și $\Phi_{CR}$, $\Phi_{CP}$, fluxul magnetic corespunde fluxului în cîmp redus în cazul unei variații liniare a caracteristicii de magnetizare (curba *2*).

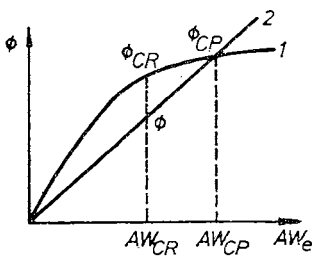


*Fig. 2.30.* Curba de magnetizare.

Din diagramă se poate scrie:

$$\frac{\Phi_{CR}}{\Phi_{CP}} > \frac{\Phi}{\Phi_{CP}} = \frac{AW_{CR}}{AW_{CP}} = \beta. \tag{2}$$

Relația *2* conduce la concluzia că fluxul de excitație în cîmp redus este mai mic decît forța magnetomotoare.

În mod practic, reducerea (slăbirea) cîmpului se face prin raportul amperspirelor.

2.5.3.1. *Metoda reducerii cîmpului prin secționarea înfășurării de excitație.* Această metodă se realizează după principiul din figura 2.31.

Forța magnetomotoare în cîmp plin (contactorul *1* închis, contactorul *2* deschis) va fi:

$$AW_{CP} = IW,$$

iar în cîmp redus (contactorul *1* deschis, contactorul *2* închis),

$$AW_{CR} = IW_1$$

Coeficientul de reducere a cîmpului este:

$$\beta = \frac{IW_1}{IW} = \frac{W_1}{W}. \tag{3}$$

Spirele $W_2$ ale înfășurării de excitație nu pot fi eliminate pentru reducerea cîmpului, prin scurtcircuitare, așa cum este indicat în figura 2.32, întrucît la o variație bruscă a curentului motorului $I$, care s-ar datora variației

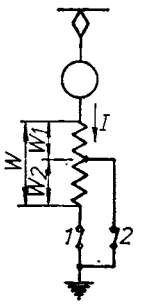



*Fig. 2.31.* Schema de reducere a cîmpului prin metoda secționării înfășurării de excitație.

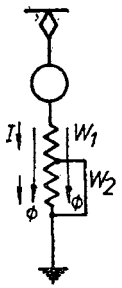



*Fig. 2.32.* Reducerea cîmpului prin metoda secționării înfășurării de excitație cu eliminarea unor spire prin scurtcircuitare.

tensiunii liniei de contact, spirele scurtcircuitate $W_2$ se comportă ca secundarul unui transformator și în ele se va induce o forță electromotoare care naște un curent $i$ avînd sensul indicat în figură.

Fenomenul agravează comutația mai ales pentru situațiile cînd pantograful se desprinde de pe linia de contact, cînd — la restabilirea circuitului — curentul $I$ crește în rotor considerabil și repede, iar în acel moment fluxul în excitație crește foarte încet.

Pentru aceste considerente secționarea înfășurării de excitație se execută ca în figura 2.31 cu întreruperea obligatorie (contactorul 1) a circuitului spirelor eliminate din circuit.

Această metodă necesită scoaterea de prize intermediare pe înfășurarea de excitație, ceea ce complică motorul din punct de vedere constructiv, motiv pentru care numărul de prize se limitează la două; aparatajul necesar este însă simplu (numai contactoare).

2.5.3.2. *Reducerea cîmpului prin șuntarea înfășurării de excitație.* Această metodă constă în montarea în derivație pe înfășurarea de excitație a unei rezistențe $r_s$, ca în figura 2.33.

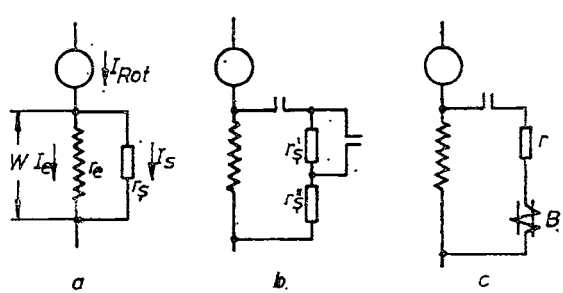



*Fig. 2.33.* Schema de reducere a cîmpului prin șuntarea înfășurării de excitație pe o rezistență: *a* — șuntarea cu o treaptă de rezistență; *b* — șuntarea cu două trepte de rezistență; *c* — șunt inductiv.

În acest caz,

$$I_e = I_{Rot} - I_ş. \tag{4}$$

La cîmp plin, forţa magnetomotoare de excitaţie va fi:

$$AW_{CP} = I_{Rot}W.$$

La cîmp redus:

$$AW_{CR} = WI_e < AW_{CP}$$

Coeficientul de reducere a excitaţiei:

$$\beta = \frac{AW_{CR}}{AW_{CP}} = \frac{I_e}{I_{Rot}} \tag{5}$$

Mărimea coeficientului $\beta$ depinde de raportul rezistenţelor circuitelor paralele (circuitul înfăşurării de excitaţie şi circuitul şuntului).

Notînd cu $r_e$ rezistenţa înfăşurării de excitaţie şi $r_ş$ — rezistenţa şuntului,

$$I_e \cdot r_e = I_ş \cdot r_ş. \tag{6}$$

Conform relaţiei (5)

$$I_e = \beta I_{Rot}. \tag{7}$$

Relaţia (4) devine:

$$I_ş = (1 - \beta)\, I_{Rot}. \tag{8}$$

Înlocuind valorile lui $I_e$ şi $I_ş$, determinate de relaţiile (7) şi (8), în relaţia (6) rezultă:

$$\beta = \frac{r_ş}{r_e + r_ş}, \tag{9}$$

adică variaţia coeficientului de şuntaj $\beta$ se obţine prin variaţia rezistenţei $r_ş$.

Schema pentru două şuntări de flux corespunde figurii 2.33, *b* şi anume:

— prima şuntare se obţine închizînd contactorul *1* şi deschizînd contactorul *2*, în care caz,

$$\beta_1 = \frac{r'_ş + r''_ş}{r_e + r'_ş + r''_ş};$$

— a doua şuntare se obţine scurtcircuitînd rezistenţa $r'_ş$ (se închide contactorul (*2*), în care caz:

$$\beta_2 = \frac{r''_ş}{r_e + r''_ş} < \beta_1.$$

Metoda variației fluxului inductor prin șuntare este aplicată în mod curent pe locomotivele electrice și în mod practic la fiecare conexiune a electromotoarelor se efectuează două, trei șuntări de flux. Numărul treptelor de cîmp redus se determină în conformitate cu variațiile admise pentru curent și forța de tracțiune.

2.5.3.3. *Șuntul inductiv.* Șuntarea fluxului printr-o rezistență ohmică pură, ca în figura 2.33, *a*, în perioada proceselor tranzitorii, conduce la un mare neajuns în funcționarea electromotorului. Astfel, spre exemplu, la o creștere bruscă a tensiunii la bornele motorului, curentul care crește în motor va trece în cea mai mare parte prin șunt din cauza autoinductanței înfășurării de excitație. Acest lucru este extrem de periculos cînd tensiunea pe electromotor variază de la zero (cînd se desprinde pantograful de pe linia de contact) pînă la valoarea ei nominală, în care caz curentul în această perioadă de tranziție, deviindu-se aproape integral prin șunt, motorul va fi lipsit de un flux suficient, iar rotorul va fi străbătut de un curent exagerat în cîmp redus (deci cînd facem șuntarea fluxului), ceea ce agravează comutația.

Pentru evitarea acestui neajuns, șuntarea fluxului inductor se aplică așa cum este indicat în figura 2.33, *c*, adică introducînd în serie cu rezistența de șuntare o bobină de inducție și constituind în ansamblu așa-numitul *șunt inductiv*, care se dimensionează ținînd seamă de selfinducția înfășurării de excitație în procesul tranzitoriu.

În perioada procesului tranzitoriu, relația (57) devine:

$$I_e \cdot r_e + L_e \frac{dI_e}{dt} = I_ș \cdot r_ș + l_ș \frac{dI_ș}{dt}, \tag{10}$$

în care:

$L_e$ este coeficientul de selfinducție al înfășurării de excitație;

$l_ș$ — coeficientul de selfinducție pentru șuntul inductiv;

$r_ș$ — suma rezistențelor ohmice și ale bobinei.

Punînd condițiile ca în orice moment să fie menținute relațiile (7) și (8), relația (10) devine:

$$\beta I_{Rot} \cdot r_e + L_e \cdot \beta \frac{dI_{Rot}}{dt} = (1 - \beta) I_{Rot} \cdot r_ș + l_ș (1 - \beta) \frac{dI_{Rot}}{dt}. \tag{11}$$

Ținînd seamă de relațiile (7) și (8), relația (6) se poate scrie:

$$\beta \cdot I_{Rot} \cdot r_e = (1 - \beta) I_{Rot} \cdot r_ș \tag{12}$$

Înlocuind (12) în (11), se obține:

$$l_ș = \frac{\beta}{1 - \beta} L_e. \tag{13}$$

Pentru mașinile cu circuit magnetic saturat, coeficientul de selfinducție al înfășurării de excitație se determină cu relația:

$$L_e = \alpha W \frac{d\Phi}{dI_e} 10^{-8}, \tag{14}$$

în care:

$\alpha$ este un coeficient subunitar care ține seamă de influența *curenților Foucault* induși în masa statorului.

Mărimea $\frac{d\Phi}{dI_e}$ și deci și $L_e$ scad pe măsură ce crește curentul de excitație, adică în măsura saturației circuitului magnetic, ca în figura 2.34.

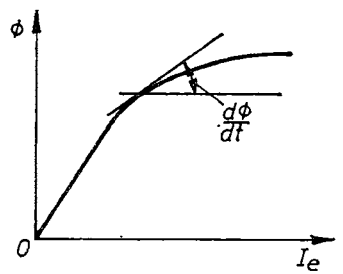



*Fig. 2.34.* Variația fluxului inductor.

Pentru menținerea raportului $l_ș = \frac{\beta}{1-\beta} L_e$ la orice valoare a lui $I_e$, trebuie să varieze respectiv $l_ș$ a cărei expresie este:

$$l_ș = W_ș \frac{d\Phi_ș}{dI_ș} 10^{-8} \qquad (15)$$

în care:

$W_ș$ este numărul de spire al șuntului inductiv;

$\Phi_ș$ — fluxul magnetic al șuntului.

Înlocuind valorile lui $L_e$ și $l_ș$ în relația (13) se obține:

$$W_ș \frac{d\Phi_ș}{dI_ș} = \frac{\beta}{1-\beta} \alpha W \frac{d\Phi}{dI_e}$$

sau ținînd seamă de relațiile (7) și (8):

$$\frac{1}{1-\beta} W_ș \frac{d\Phi_ș}{dI_{Rot}} = \frac{\beta}{\beta(1-\beta)} W \frac{d\Phi}{dI_{Rot}}$$

sau

$$W_ș d\Phi_ș = \beta W d\Phi.$$

Prin integrare, ținînd seama că valoarea constantei de integrare este $C = 0$ (deoarece la $\Phi = 0$ și $\Phi_ș = 0$) se obține:

$$\Phi_ș = \frac{\alpha W}{W_ș} \Phi, \qquad (16)$$

adică fluxul șuntului inductiv $\Phi_ș$ trebuie să varieze proporțional cu fluxul motorului $\Phi$, condiție care se realizează prin alegerea inducției fierului bobinei și a mărimii întrefierului.

Șuntul inductiv calculat pentru un coeficient de șuntare $\beta$ nu va satisface condițiile (13) și (16) pentru un alt coeficient de șuntare $\beta_1$.

Pentru coeficientul $\beta$, forța magnetomotoare a înfășurării de excitație a motorului va fi:

$$W \cdot I_e = W \cdot \beta \cdot I_{Rot}.$$

Pentru șunt:

$$W_ș \cdot I_ș = W_ș(1 - \beta) \cdot I_{Rot}$$

$$\frac{AW_ș}{AW_e} = \frac{W_ș(1 - \beta)}{W \cdot \beta} = const.$$

Raportul fluxurilor, corespunzător ecuației (16), la variația lui β nu va fi respectat. Pentru $\beta_1$, diferit de β, restabilirea raportului forțelor magnetomotoare se poate face schimbînd numărul de spire al șuntului conform relațiilor:

$$\frac{W'_ș(1 - \beta_1)}{W \cdot \beta_1} = \frac{W_ș(1 - \beta)}{W \cdot \beta};$$

$$W'_ș = \frac{\beta_1(1 - \beta)}{(1 - \beta_1)} \cdot W_ș. \tag{17}$$

Secționarea bobinei șuntului fiind o complicație, pentru a evita acest lucru șuntul inductiv se calculează astfel ca la toate regimurile de lucru.

$$l_ș > \frac{\beta}{1 - \beta} \cdot L_e. \tag{18}$$

Pentru $l_ș$ mai mare ca $L_e$, la stabilirea tensiunii și creșterii curentului în motor, o mare parte din curent trece prin înfășurarea de excitație și chiar dacă trece integral, aceasta nu constituie un pericol pentru motor, întrucît motorul va lucra la cîmp plin, iar stabilirea cîmpului redus se va face treptat.

Conform relației (16) între $\Phi_ș$ și $\Phi$ există o dependență complexă, din cauza coeficientului α care depinde de $I_e$, $\Phi$, $\frac{d}{dI_e}$, $\frac{d\Phi}{dt}$ și nu poate fi redată ușor prin calcul.

Practic, la alegerea șuntului inductiv se utilizează relația:

$$W_ș \geqslant 0{,}5 \cdot W_e \cdot p \frac{q_e}{q_ș}, \tag{19}$$

în care:

$W_ș$ este numărul de spire al șuntului;
$W_e$ — numărul de spire al înfășurării polilor principali;
$p$ — numărul perechilor de poli;
$q_ș$ — secțiunea miezului de fier al șuntului;
$q_e$ — secțiunea polului principal.

Metoda șuntării înfășurării de excitație, deși necesită aparataj mai complicat (rezistențe, self, contactori), întrucît nu impune modificarea constructivă a motorului, este aplicată în mod curent pe locomotive.

2.5.3.4. *Caracteristicile electromotorului în cîmp redus.* Trasarea caracteristicii $V(I)$ în cîmp redus se face uşor atunci cînd se cunoaşte caracteristica corespunzătoare cîmpului plin (figura 2.35).

Pentru simplificarea construcţiei se neglijează căderea de tensiune internă în maşină atît la cîmp plin, cît şi la cîmp redus.

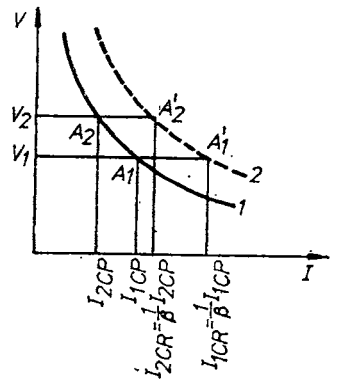



*Fig. 2.35.* Trasarea caracteristicii $V(I)$ în cîmp redus: *1* — caracteristica în cîmp plin: *2* — caracteristica în cîmp redus.

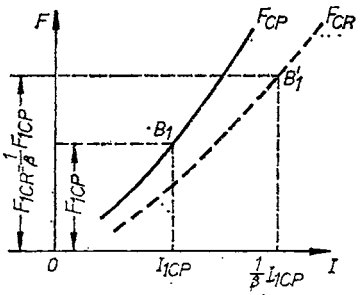



*Fig. 2.36.* Trasarea caracteristicii $F(I)$ în cîmp redus.

Pentru a avea aceeaşi viteză $V_1$ atît în cîmp plin, cît şi în cîmp redus, trebuie ca fluxul magnetic, respectiv forţa magnetomotoare, să fie aceeaşi, adică:

$$AW_{CR} = AW_{CP}, \text{ sau } W_2 \cdot I_{CR} = W_1 \cdot I_{CP}.$$

Ţinînd seamă că $\beta = \dfrac{AW_{CR}}{AW_{CP}}$, rezultă că pentru satisfacerea condiţiei de mai sus trebuie ca între curenţi să existe raportul

$$I_{CR} = \frac{1}{\beta} I_{CP}. \tag{20}$$

Trasarea curbei *2* în cîmp redus, pentru aceeaşi viteză, se face punct cu punct, multiplicînd valoarea curentului de pe caracteristica *1* a cîmpului plin cu $\dfrac{1}{\beta}$.

În diagrama din figura 2.35 este indicat modul cum se obţin două puncte $A'_1$ şi $A'_2$ pe caracteristica în cîmp redus, corespunzător punctelor $A_1$ şi $A_2$ de pe caracteristica în cîmp plin, pentru valorile vitezei $V_1$, respectiv $V_2$.

Trasarea caracteristicii $F(I)$ în cîmp redus, din caracteristica respectivă a cîmpului plin, se poate face conform figurii 2.36.

În momentul trecerii pe cîmp redus, raportul curenţilor pentru o aceeaşi viteză fiind definit de relaţia (20), rezultă pentru forţa de tracţiune expresia:

$$F_{CR} = k \cdot \Phi \cdot I_{CR} = k \cdot \Phi \frac{1}{\beta} \cdot I_{CP} \cong \frac{1}{\beta} F_{CP}. \tag{21}$$

Adică la aceeași viteză, forța de tracțiune în cîmp redus crește aproximativ invers proporțional cu coeficientul de șuntaj datorită cărui fapt are loc accelerarea în continuare a trenului.

În diagrama 2.36 s-a trasat construcția unui punct $B_1'$ pe caracteristica $F_{CR_2} = f(I)$, corespunzător punctului $B_1$ de pe caracteristica $F_{CP} = f(I)$. Întrucît relația de calcul pentru forța de tracțiune în cîmp redus este:

$$F_{CR} = \frac{0{,}367 \cdot U \cdot I_{CR} \cdot \eta_{CR}}{V_{CR}}, \tag{22}$$

rezultă că metoda indicată mai sus neglijează variația randamentului $\eta_{CR}$ (motor și angrenaj).

Trasarea caracteristicii $F(V)$ în cîmp redus se face punct cu punct din cele două caracteristici $V(I)$ și $F(I)$ prin eliminarea variabilei $I$. Față de caracteristica $F(V)$ la cîmp plin, cea de cîmp redus se plasează deasupra acesteia, ca în figura 2.37.

Efectul șuntării rezultă din această diagramă și anume: pentru aceeași viteză $V_1$ prin șuntare forța de tracțiune crește de la $F_1$ la $F_2$ sau pentru aceeași forță de tracțiune $F_1$ prin șuntare se mărește viteza de la $V_1$ la $V_2$.

Figura 2.37 arată că în cîmp redus, pentru aceeași viteză, caracteristica $F(V)_{CR}$ se deplasează către forțe de tracțiune mai mari. Aceasta are importanță deosebită în domeniul vitezelor mari, cînd puterea motorului nu crește propriu-zis ($I_a$ crește, însă $\Phi_{CR}$ scade) ci această creștere a lui $F$ corespunde totuși conform posibilităților termice ale motorului.

În vederea utilizării puterii locomotivei pe o zonă cît mai largă, în planul $F(V)$, la fiecare conexiune a motoarelor, este indicat a opera o reducere a cîmpului cît mai importantă, pentru a obține o zonă cît mai largă între caracteristica de cîmp plin $CP$ și ultima caracteristică a cîmpului redus $CR$ adică zona hașurată din figura 2.38, în care se sporește în mod sensibil capacitatea de utilizare a locomotivei la cele mai variate servicii. Acest lucru definește

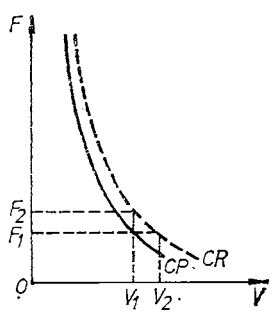



*Fig. 2.37.* Caracteristica $F(V)$ în cîmp redus.

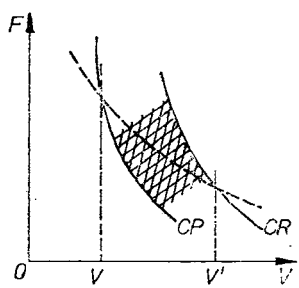



*Fig. 2.38.* Diagrama capacității de utilizare a unei locomotive la funcționarea în cîmp redus a motoarelor.

ceea ce se cheamă *coeficientul de suplețe*, a cărui interpretare rezultă din diagrama prezentată în figura 2.38.

Trasînd hiperbola de putere constantă (curba figurată cu linie întreruptă) corespunzînd puterii regimului nominal a locomotivei, se constată că pe

caracteristica de cîmp plin ea poate fi utilizată la viteza $V$, iar pe cea de cîmp redus la viteza $V'$. Raportul $\frac{V'}{V}$ determină coeficientul de suplețe (raportul vitezelor extreme între care puterea nominală poate fi dezvoltată).

La construcțiile vechi, acest coeficient era de ordinul 1,3 iar la unele locomotive noi coeficientul de suplețe atinge valoarea 2,3.

Importanța unei cît mai mari reduceri a cîmpului asupra sporirii performanțelor locomotivei rezultă și din examinarea diagramei prezentată în figura 2.39 unde s-au trasat caracteristicile de tracțiune $F(V)$ la cîmp plin și pentru diverse trepte de cîmp redus ($CR$ 75%, 57% ···, 29%) și corespunzător tonajele ce se pot remorca la $V = 150$ km/h. Se observă că acestea cresc de la 200 t pentru cîmp plin, la 1080 t corespunzător $CR$ 29% (diagrama din fig. 2.39 corespunde locomotivei electrice Bo — Bo seria 9200 *SNCF* *).

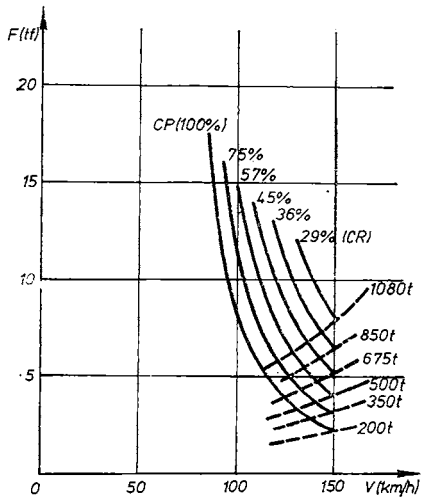



*Fig. 2.39.* Influența nivelului de reducere a cîmpului asupra performanțelor locomotivei.

Evoluția motoarelor de tracțiune în ultima perioadă a fost caracterizată prin reducerea cîmpului începînd cu 75%, 60%, 50% ... și succesiv s-a ajuns la construcțiile cele mai recente la 25%. Diminuarea cîmpului, dacă prezintă avantajele subliniate mai sus în schimb comutația motorului se agravează la funcționarea în cîmp redus și conduce la deteriorarea colectorului, portperiilor și în mod frecvent izolația motorului și de aceea se impun măsuri constructive suplimentare, ca spre exemplu introducerea înfășurării de compensație, reducerea limitei vitezei periferice a colectorului, reducerea cîmpului să se facă prin șunt inductiv.

2.5.4. **Reglarea reostatică.** Ecuația turației (viteza) motorului la tensiunea $U$ și fără rezistor în circuit este:

$$V = \frac{U - rI}{K\Phi}. \tag{1}$$

Înseriind în circuitul motorului un rezistor de valoare $R$, ecuația (1) devine:

$$V_1 = \frac{U - (r + R)I}{K\Phi}. \tag{2}$$

* *SNCF* — Căile Ferate Franceze.

Pentru același curent $I$, în ambele situații $\Phi$ este același și împărțind relațiile (2) la (1) rezultă:

$$V_1 = V \frac{U - (r + R)I}{U - rI}, \tag{3}$$

deci, $V_1$ (cînd se înseriază o rezistență adițională) $< V$, iar caracteristica cu reostat se plasează sub caracteristica $V(I)$ fără reostat și pentru aceeași tensiune $U$.

Caracteristica $V(I)$ cu reostat în circuit de valoare $R_1$ pentru o tensiune $U$ aplicată la bornele circuitului ($R$ + motor) se obține prin puncte din caracteristica $V(I)$ la tensiunea $U$ aplicînd relația (3) și luînd ca parametru $I$, așa cum rezultă și din figura 2.40. Înserierea unei rezistențe adiționale în circuitul motorului are drept efect producerea unei căderi de tensiune $RI$ pe rezistor și diferența $U - RI$ se aplică pe motor; deci reglarea reostatică este în fond o reglare prin variația tensiunii la bornele motorului.

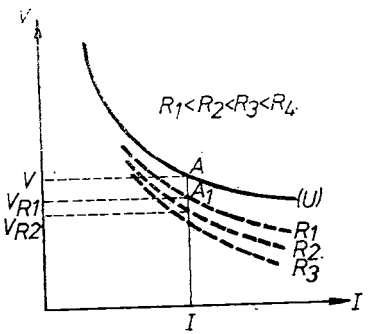


*Fig. 2.40.* Caracteristici $v(I)$ reostatice.

Combinînd caracteristicile $V(I)_R$ cu $F(I)$ a motorului se obțin tot atîtea caracteristici reostatice $F(V)_R$ pentru locomotivă. Aceste caracteristici se practică în perioada de demaraj [de la $V = 0$ pînă se intră pe prima caracteristică naturală $F(V)_s$], și între caracteristicile corespunzătoare tensiunilor ce rezultă prin interconectarea motoarelor de tracțiune (între $F(V)_s \ldots F(V)_{s-p}$ și $F(V)_{s-p} \ldots F(V)_p$).

2.5.5. **Ansamblul caracteristicilor de tracțiune.** Din combinarea celor trei metode, descrise mai sus, pentru variația vitezei, se deduce ansamblul caracteristicilor de tracțiune ca în figura 2.41.

Pentru fiecare conexiune între motoare, rezultă cîte o caracteristică de tracțiune de bază pentru cîmpul plin $CP$ (trasată cu linie plină). La fiecare conexiune ($s$, $s - p$, $p$) se reglează excitația prin șuntare, obținîndu-se caracteristicile în cîmp redus $CR$ (trasate cu linie punctată.) Aceste caracteristici sînt denumite caracteristici ce corespund regimurilor economice de funcționare.

Trecerea de la o conexiune la alta între motoare conduce la o diferență de tensiune mare aplicată pe motor, ceea ce ar avea ca efect variații mari și inadmisibile ale forței de tracțiune, fapt ce impune folosirea de caracteristici intermediare obținute cu diverse valori de rezistență în circuit. Aceste caracteristici sînt folosite pînă se ajunge la prima caracteristică a conexiunii serie și între conexiuni. Întrucît în rezistența adițională se consumă energie ce se disipează sub formă de căldură, caracteristicile cu reostat sînt denumite neeconomice și mecanicul trebuie să treacă repede peste acestea (caracteristicile figurate linie-punct).

Domeniul de folosire ale caracteristicilor de tracțiune este limitat pe de o parte de motorul de tracțiune care nu poate funcționa normal la orice regim, iar pe de altă parte de aderența locomotivei.

Turația maximă a motorului conduce la viteza maximă constructivă a locomotivei ($V_{max}$); curentul maxim admis de motor conduce la forța maximă de tracțiune ($F_{max}$) cu limitările respective la fiecare conexiune ($s$, $s-p$, $p$) și în cadrul fiecărei conexiuni la $CP$ și $CR$; slăbirea maximă a cîmpului la

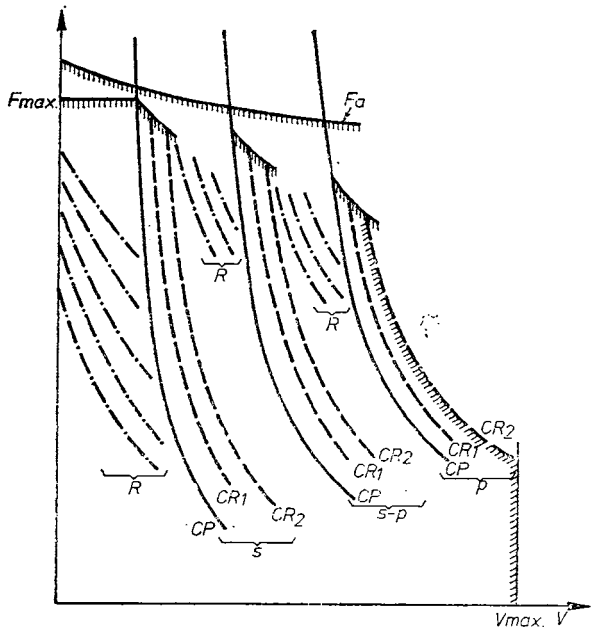



*Fig. 2.41.* Ansamblul caracteristicilor de tracțiune la o locomotivă de curent continuu.

ultima conexiune ($p$) reprezintă de asemenea o limitare. Toate aceste limitări după motor s-au reprezentat cu linie haşurată (fig. 2.41).

Limitarea forței de tracțiune după aderență ($F_a$), care este specifică vehiculelor motoare pe șină, se face conform relație;

$$F_a = G_a \varphi_a,$$

unde:

$G_a$ este greutatea aderentă a locomotivei;

$\varphi_a$ — coeficientul de aderență, care se calculează în funcție de $V$ cu formule empirice deduse experimental.

2.5.6. **Deformarea caracteristicii de tracțiune după diverși parametri.** Acești parametri sînt tensiunea, rezistența înseriată în circuitul motorului și raportul de transmitere al agrenajului.

2.5.6.1. *Influența tensiunii.* $F(V)$ este o caracteristică de tracțiune pentru o tensiune pe motor $U$ (figura 2.42). La un curent $I_1$ corespunde o forță de tracțiune $F_1$ care determină punctul de funcționare $A_1(F_1, V_1)$. Dacă tensiunea aplicată motorului devine $U' > U$ punctul de funcționare se va muta în $A_2$ deci pe o altă caracteristică a cărei poziție rezultă astfel:

— La același $I_1 = ct$ se va menține $F_1$ (se duce paralelă prin $F_1$ la axa $OV$).

— În ambele cazuri $\Phi$ este același și $E_c = K\Phi V$ sînt proporționale cu viteza, $\frac{V_1}{V_2} = \frac{E_{c1}}{E_{c2}} = \frac{U - rI_1}{U' - rI_1}$; neglijînd $rI$ (este mic în raport cu $U$) rezultă că:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{U}{U'} \text{ și deci } V_2 = V_1 \frac{U'}{U}, \text{ respectiv } V_2 > V_1.$$

— Punctul de funcționare $A_1$ se deplasează în $A_2$ ($V_2$, $F_1$).

Din punct de vedere practic se poate aproxima că la schimbarea tensiunii caracteristica $F(V)$ nu se deformează ci se translatează, conform relației $\frac{V_1}{V_2} = \frac{U}{U'}$ (v. și § 5.2 — 3).

2.5.6.2. *Influența unei rezistențe înseriate în circuitul motorului.* Pe o caracteristică $F(V)$ corespunzătoare unei tensiuni $U$, $A_1$ fiind un punct de funcționare se pune întrebarea deplasării lui (punctul $A_2$) cînd în circuit înseriem un rezistor $R$ (figura 2.43).

Fără rezistor, ecuația tensiunii este: $U = E_{c1} + rI$.

Cu rezistor, $U = E_{c2} + (r + R)\, I$, pentru același $I$.

În ambele cazuri $\Phi$ este același ($I$ fiind același), iar $E_c = K\Phi V$, respectiv $\frac{V_1}{V_2} = \frac{E_{c1}}{E_{c2}} = \frac{U - rI}{U - (r + R)I}$, de unde rezultă $V_2 = V_1\left(\frac{U - (r + R)I}{U - rI}\right)$, cu $V_2 < V_1$.

Curentul $I$ fiind același, se menține deci $F_1$, iar punctul $A_2$ va avea coordonatele ($V_2$, $F_1$).

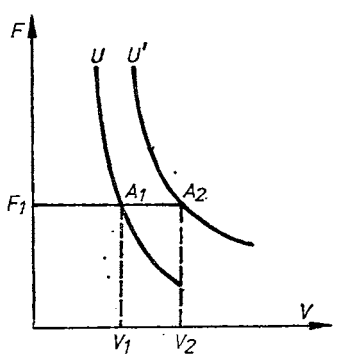



*Fig. 2.42.* Influența tensiunii asupra deformării caracteristicii de tracțiune.

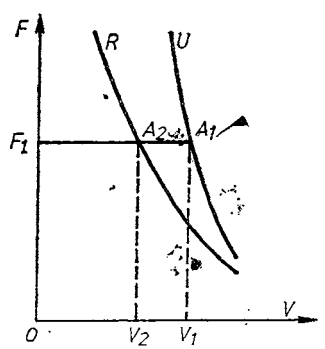



*Fig. 2.43.* Influența unei rezistențe înseriate în circuitul motorului asupra caracteristicii de tracțiune.

Pentru diverse valori ale reostatului $R > R_1 > R_2 \ldots$ se obține o familie de caracteristici a căror alură este reprezentată în figura 2.44 (v. și

§ 5.4), adică rezistența $R$ plasează caracteristica respectivă (cu reostat) sub caracteristica naturală (fără reostat) și o culcă din punct de vedere al alurii.

2.5.6.3. *Influența raportului de transmitere al angrenajului.* Curba $\gamma$ este o caracteristică $F(V)$ pentru o tensiune $U$ și un raport de transmisie $u$, iar $A(V, F)$ un punct de funcționare (fig. 2.45). Schimbînd raportul de transmi-

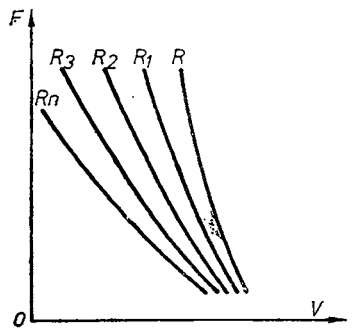



*Fig. 2.44.* Caracteristici de tracțiune reostatice.

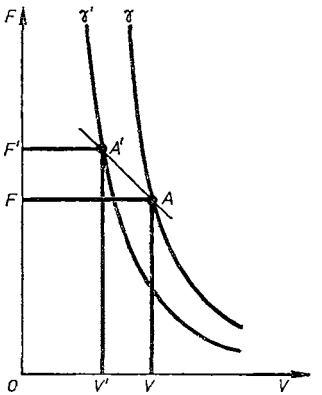



*Fig. 2.45.* Influența raportului de transmisie asupra caracteristicii de tracțiune.

sie $u' > u$, să examinăm deformarea caracteristicii $\gamma$ (influența raportului de transmisie).

Notînd $a = \frac{u}{u'}$ (deci $a < 1$), $V$ fiind viteza locomotivei pentru $u$, devine $V' = aV$ pentru $u' > u$. Puterea la obadă rămîne aceeași (admițînd randamentul constant), în ambele cazuri:

$$P = C\omega = C'\omega'; \quad \frac{C}{C'} = \frac{\omega'}{\omega} = \frac{V'}{V} = a = \frac{F}{F'}.$$

Deci $V' = aV$ și $F' = \frac{F}{a}$ de unde rezultă deplasarea punctului de funcționare în $A'\left(V' = aV < V;\ F' = \frac{F}{a} > F\right)$ și caracteristica $\gamma$ devine $\gamma'$.

În punctele $A$ și $A'$ însă avem $F'V' = FV$ (puterile la obadă sînt aceleași) adică la variația lui $u$ locul geometric al punctului $A$ este o hiperbolă de echiputere.

Schimbarea raportului de transmisie oferă posibilitatea ca folosind același motor de tracțiune să construim locomotive cu performanțe deosebite, după cerințele exploatării. Din figura 2.45 se observă că folosind raportul de transmisie $u'$ rezultă o forță de tracțiune mare $F'$ ce poate fi dezvoltată pînă la viteza $V'$ (specific locomotivelor de marfă); iar cu $u$ se obține $F$ (mai mică) ce poate fi menținută pînă la $V$ (specific locomotivelor de călători).

## 2.6. DEMARAJUL ŞI REGLAREA

2.6.1. **Generalităţi şi condiţii.** Prin demaraj se înţelege procesul de creştere a vitezei de la valoarea zero ($V = 0$) pînă la o valoare corespunzătoare intrării pe caracteristica regimului nominal de funcţionare.

La motorul de curent continuu, expresia curentului fiind $I = \frac{U - K\Phi V}{r}$, conduce la pornire (pentru $V = 0$) la $I_p = \frac{U}{r}$ adică o valoare exagerat de mare şi netolerată de motor (*V.* § 4.3).

Din caracteristica $V(I)$ a motorului (fig. 2.46) se observă că la pornire trebuie să limităm curentul la o valoare maximă, $I_{max}$, suportată de motor căreia îi corespunde viteza de ieşire $v_i$ pe caracteristica de tensiune $U$ şi cîmp plin. Demarajul este tocmai procesul creşterii vitezei de la $V=0$ la $V=v_i$.

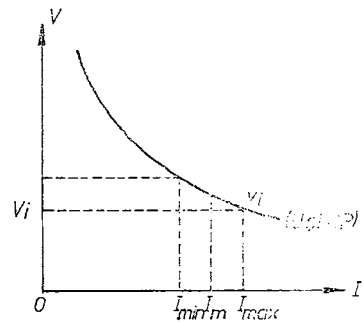



*Fig. 2.46.* Caracteristica $V(I)$ şi oscilaţiile curentului.

Aşa cum s-a arătat, limitarea curentului se face înseriind o rezistenţă $R$ în circuitul motorului, a cărei valoare rezultă din:

$$I_{max} = \frac{U - K\Phi V}{r + R}; \text{ pentru } V = 0,\ R = \frac{U}{I_{max}} - r.$$

Pentru îndeplinirea condiţiei fundamentale în perioada de demaraj, adică trenul să accelereze este necesar ca forţa de tracţiune să fie constantă în această perioadă, ceea ce revine la menţinerea lui $I_{max} = const.$ Pe măsură ce $V$ creşte, pentru ca $I_{max}$ să rămînă constant, trebuie scăzută valoarea $R$, iar cînd se ajunge la $V = v_i$ atunci $R = 0$. Deci ,trebuie găsită o lege de variaţie a rezistenţei adiţionale $R$ în funcţie de viteza $V$, adică $R(V)$ pentru a rezulta ca $I_{max}$ impus să se menţină constant pe toată perioada de demaraj.

Eliminarea reostatului $R$ din circuit în mod continuu nu este posibil, fiind vorba şi de curenţi mari în circuit, întrucît ar conduce la complicaţii constructive practic de nerealizat şi de aceea eliminarea lui $R$ se face în trepte. La fiecare eliminare a unei trepte de reostat va rezulta o creştere bruscă a curentului, însă aceasta nu trebuie să depăşească valoarea $I_{max}$ admisă de motor. Eliminarea rezistenţei se va face la un curent minim $I_{min}$, astfel ca saltul de curent să atingă valoarea $I_{max}$, adică demarajul va avea loc între două limite de oscilaţie ale curentului $I_{min}$ şi $I_{max}$ din care rezultă curentul mediu de demaraj $I_m$ (fig. 2.46).

Curenţii de demaraj $I_{max}$, $I_{min}$ şi $I_{med}$, evident determină forţele de tracţiune respective în perioada de demaraj $F_{max}$, $F_{min}$, $F_{med}$ (figura 2.47), iar acestea determină acceleraţiile $a_{max}$, $a_{min}$, $a_{med}$. Admiţînd oscilaţii ale curentului în perioada de demaraj între limitele $I_{max} \ldots I_{min}$, vor rezulta oscilaţii respectiv ale forţei de tracţiune între limitele $F_{max} \ldots F_{min}$ şi $a_{max} \ldots a_{min}$. Calitatea demarajului este caracterizată prin aşa-numiţii *coeficienţi de osci-*

*laţie* (neregularitate) de curent, forţă de tracţiune şi acceleraţie definiţi prin relaţiile:

$$K_i = \frac{I_{max} - I_{min}}{2I_m}, \text{ unde } I_m = \frac{I_{max} + I_{min}}{2}; \tag{1}$$

$$K_F = \frac{F_{max} - F_{min}}{2F_m}, \text{ unde } F_m = \frac{F_{max} + F_{min}}{2}; \tag{2}$$

$$K_a = \frac{a_{max} - a_{min}}{2a_m}, \text{ unde } a = \frac{dv}{dt} \text{ şi } a_m = \frac{a_{max} + a_{min}}{2}. \tag{3}$$

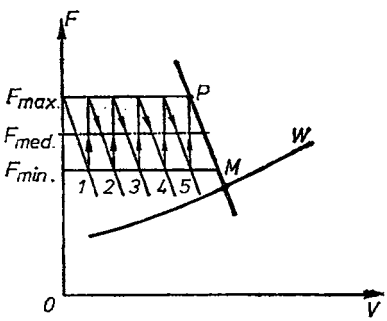


*Fig. 2.47.* Oscilaţiile forţei de tracţiune în perioada de demaraj.

Coeficientul de oscilaţie al acceleraţiei este totdeauna mai mare decît al forţei de tracţiune şi curentului, adică există inegalitatea

$K_a > K_F > K_i$, care rezultă din următoarele:

$$a_{max} = \left(\frac{dv}{dt}\right)_{max} = \frac{F_{max} - G(w + i)}{1000\,G(1 + \gamma)} \cdot 9{,}81; \tag{4}$$

$$a_{min} = \left(\frac{dv}{dt}\right)_{min} = \frac{F_{min} - G(w + i)}{1000\,G(1 + \gamma)} \cdot 9{,}81, \tag{5}$$

unde:

$a$ este acceleraţia în m/s²;
$G$ — greutatea totală a trenului, în tf;
$w$ — rezistenţa specifică la rulare în palier şi aliniament, în kgf/t;
$i$ — rezistenţa specifică în rampă, în kgf/t;
$1 + \gamma$ — coeficient de echivalare a maselor în mişcarea de rotaţie.

Ecuaţiile (1) şi (2) rezultă din ecuaţia generală a mişcării trenului:

$$F - W = (1 + \gamma)\, m \frac{dv}{dt}.$$

Acceleraţia medie va fi:

$$a_m = \frac{a_{max} + a_{min}}{2} = \frac{9{,}81}{2.1000\,G(1 + \gamma)} [F_{max} - F_{min} - 2G(w + i)]. \tag{6}$$

Ţinînd seamă de relaţiile (4), (5), (6) relaţia (3) devine:

$$K_a = \frac{F_{max} - F_{min}}{F_{max} + F_{min} - 2G(w + i)} = \frac{F_{max} - F_{min}}{2\frac{F_{max} + F_{min}}{2} - 2G(w + i)}. \tag{7}$$

Din (2) rezultă $\frac{F_{max}-F_{min}}{2} = K_F F_m$, iar relația (7) devine:

$$K_a = K_F \frac{F_m}{F_m - G(w+i)}, \text{ deci } K_a > K_F > K_I. \tag{8}$$

Cum, $F = KC = K\Phi I$ rezultă că la o oscilație a curentului și $\Phi$ va oscila corespunzător (motorul fiind serie) ceea ce antrenează o oscilație mai mare a lui $F$, de unde rezultă valabilitatea relației (8).

Pentru ca la demaraj locomotiva să nu patineze trebuie ca forța maximă de tracțiune ($F_{max}$) să nu depășească forța de tracțiune limitată de aderență, adică,

$$F_{max} \leqslant G_a \varphi_a, \tag{9}$$

$G_a$ este greutatea aderentă a locomotivei;
$\varphi_a$ — coeficientul de aderență la demaraj.
Din relațiile de mai sus se obține succesiv:

din (9) ... $\frac{F_{max}}{G_a} \leqslant \varphi_a$;

din (2) ... $2K_F F_m = F_{max} - F_{min}$; $2F_m = F_{max} + F_{min}$; (10)

din (10) ... $F_{max} = (1 + K_F) F_m$, (11)

introducînd (11) în (9) rezultă $F_m \leqslant \frac{\varphi_a G_a}{1 + K_F}$, (12)

care demonstrează că forța de tracțiune medie de demaraj ($F_m$) posibilă a fi realizată fără pericol de patinaj este cu atît mai mare cu cît coeficientul de oscilație al forței de tracțiune $K_F$ (respectiv $K_I$) este mai mic.

Forța de tracțiune maximă ($F_{max}$) este limitată și după aderența locomotivei și după curentul maxim admis de motor. Este mai simplu să se determine forța de tracțiune maximă limitată de aderență pentru un motor, $F_{1a} = \frac{F_a}{m}$, ($F_a = G_a \varphi_a$ și $m$ — numărul motoarelor) și pentru valoarea $F_{1a}$, din caracteristica motorului $F(I)$, rezultă $I_{max}$ limitat după aderență, valoare ce se compară cu aceea admisă de motor ($I_{max}$ este un parametru al motorului). Din această comparație se determină $I_{max}$ de calcul.

Pentru un $F_{max}$ dat (ales prin tatonarea de mai sus) dacă se dorește un demaraj mai rapid, trebuie ca $F_m = \frac{F_{max}+F_{min}}{2}$ să fie mare, ceea ce presupune $F_{min}$ cît mai aproape de $F_{max}$ (ecart mic) lucru ce atrage număr mare de trepte de rezistență (fig. 2.47) și deci un reostat complicat. Experiența arată că se obțin rezultate satisfăcătoare dacă,

$\frac{F_{max}}{F_{min}} = 1{,}10 \ldots 1{,}20$ (pentru locomotive)

$\frac{F_{max}}{F_{min}} = 1{,}15 \ldots 1{,}30$ (pentru rame electrice, unde este nevoie de accelerație mult mai mare).

Oscilația forței de tracțiune admisă din considerente practice conduce la oscilații de curent corespunzătoare (mai mici) de ordinul

$$I_{min} = (0{,}85 \ldots 0{,}9)\, I_{max}.$$

În principal demarajul locomotivei constă în a determina numărul treptelor și valoarea fiecărei trepte de rezistență a reostatului în condițiile impuse pentru oscilația curentului. Valoarea treptei de rezistență depinzînd de parametrii motorului, tensiunea aplicată, numărul motoarelor și schema de conexiuni a acestora, calculul se efectuează pentru un singur motor la o tensiune dată (corespunzătoare unei conexiuni; de regulă se începe pentru tensiunea $U_{serie}$). Reostatul fiind de regulă unul singur, treptele sale pentru celelalte conexiuni se corectează în funcție de tensiunea aferentă, numărul ramurilor legate în paralel și numărul motoarelor legate în serie pe ramură.

2.6.2. **Metoda grafo-analitică pentru calculul reostatului.** În figura 2.48 s-a trasat caracteristica $V(I)$ a motorului pentru tensiunea la borne $(U_s)$ corespunzătoare conexiunii serie și oscilațiile admise pentru curent.

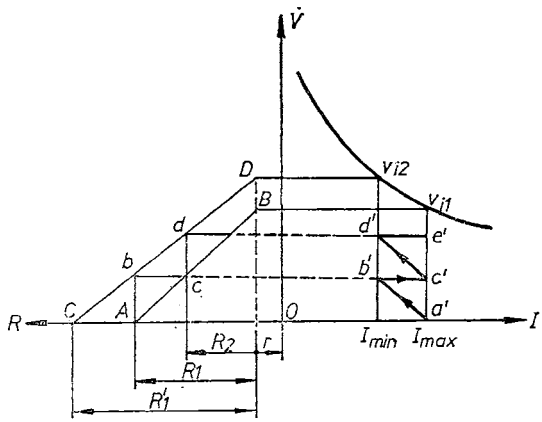



*Fig. 2.48.* Determinarea treptelor reostatului de pornire pentru cazul unui motor.

2.6.2.1. *Stabilirea treptelor normale.* În perioada de demaraj menținînd curentul constant $I = const.$, rezultă $\Phi = const$, $E_c = K\Phi V$, $E_c = KV$ și ecuația tensiunii va fi: $U = KV + (r + R)I$ din care rezultă că $R(V)$ reprezintă o dreaptă.

Pentru valorile limită ale curenților, avem:

$$U = KV + (r + R_1)\, I_{max}. \ldots\ldots\ldots\ldots \text{(dreapta } AB); \qquad (13)$$

$$U = KV + (r + R_1')\, I_{min}. \ldots\ldots\ldots\ldots \text{(dreapta } CD).$$

Coordonatele punctului $A$ rezultă punînd condiția $V = 0$ în (13); rezultă $r + R_1 = \dfrac{U}{I_{max}}$ și deci $A(r + R_1; 0)$.

Coordonatele lui $C$ rezultă din (2), $C(r + R_1'; 0)$.

Coordonatele $B$ și respectiv $D$ se deduc din condiția că la eliminarea reostatului $R_1 = 0$, $R_1' = 0$ rămîne motorul numai cu rezistența sa internă $r$, iar vitezele vor fi cele de ieșire pe caracteristica naturală $v_{i1}$, $v_{i2}$; $B(r, v_{i1})$ $D(r, v_{i2})$.

La demaraj $V = 0$, $I_{dem} = I_{max}$ și rezistența reostatului va fi $R_1$ (prima treaptă a reostatului). Viteza crește, curentul scade pînă la $I_{min}$ — punctul $b'$ pe caracteristica $V(I)$ și $b$ pe caracteristica $R(V)$ — se scoate o treaptă de rezistență astfel ca $I$ să sară la $I_{max}$ (în acest interval de timp foarte mic, datorită inerției trenului $V = const$). Grafic, din $A$ se ridică verticala $Ab$, iar din $b$ se duce orizontala $b\ b'c'$; verticala prin punctul $c$ determină valoarea rezistenței $R_2$ (a doua treaptă a reostatului) ... și continuînd raționamentul în acest mod se determină toate treptele reostatului pînă la ieșirea pe caracteristica naturală.

Pe diagrama $V(I)$ segmentele de curbă $a'b'$, $c'd'$ ... reprezintă porțiuni din caracteristicile de reglaj reostatic (corespunzătoare rezistențelor înseriate $R_1$, $R_2$ ...) și arată procesul de variație a curentului cu creșterea vitezei; segmentele $b'c'$, $d'e'$ ... sînt oscilațiile de curent la viteză constantă, corespunzător schimbării treptei de rezistență.

Pe diagrama $R(V)$ segmentele $\overline{bc}$, $\overline{de}$ ... reprezintă valoarea cu care se micșorează treapta de rezistență următoare.

Cum locomotiva dispune de mai multe motoare ce se conectează diferit (serie, serie-paralel, paralel), valoarea treptei de reostat depinzînd de tensiunea aplicată, numărul motoarelor și schema de conectare, calculul reostatului se face pentru un singur motor la tensiunea corespunzătoare conexiunii serie, ca mai sus, iar reostatul fiind de regulă unul singur, treptele sale pentru celelalte conectări ($R'$) se corectează în funcție de rezistența ($R$) rezultată la conexiunea serie, numărul de motoare $m$ legate în serie și căile paralele $p$ de $m$ motoare în serie, adică,

$$R' = R\frac{m}{p}.$$

2.6.2.2. *Calculul treptelor de manevră și a celor auxiliare.* La conectarea în serie a motoarelor de tracțiune treptele determinate pentru condiția de demaraj, în care locomotiva își dezvoltă efortul maxim, sînt precedate de un grup de trepte denumite trepte de manevră.

Aceste trepte servesc pentru limitarea, în timpul manevrelor, a accelerației inițiale luată în considerare la demarajul convoiului. Acest lucru este necesar pentru a permite întinderea fără smucituri a aparatelor de legare a convoiului și pentru a preîntîmpina șocurile de curent în cazul în care rezistența reostatului de pornire își reduce valoarea sa datorită temperaturii.

Intensitatea $I$ pentru prima treaptă de manevră se determină din efortul pe care trebuie să-l dezvolte electromotoarele pentru a demara locomotiva izolată cu o accelerație de 0,4 ... 0,6 m/s$^2$.

În general, numărul treptelor de manevră este cuprins între patru și șase, iar prin împărțirea intervalului $I - I_{min}$ la numărul treptelor alese se determină valoarea curenților pentru fiecare treaptă de manevră în parte.

Ținînd seama de rezistența internă a electromotoarelor și utilizînd *legea lui Ohm*, rezultă valoarea rezistenței fiecărei trepte în parte.

Treptele auxiliare preced treptele de demaraj ale celei de a doua și a treia conectări a electromotoarelor.

Existența lor este justificată prin faptul că ele înlătură șocul de curent ce ar putea avea loc la trecere de la o conexiune la alta, în cazul în care curentul ce străbate electromotorul în conexiunea de la care se trece este mai mic decît $I_{min}$. Numărul acestor trepte se recomandă a fi de două și se determină pornind de la folosirea valorilor ultimelor trepte de manevră corectate în funcție de saltul de tensiune și numărul căilor în paralel a motoarelor.

2.6.2.3. *Calculul termic al reostatului.* O dată treptele reostatului determinate se întocmește schema circuitului de forță al locomotivei.

Numărul elementelor de rezistență, precum și tipul acestor elemente care alcătuiesc secția de rezistențe respectivă, se determină după efectuarea unui calcul termic.

Ca bază a calculului termic servesc curentul efectiv $I_{ef}$, care parcurge secția de rezistențe și timpul $t$, care este egal cu durata curentului în secția respectivă.

Dacă în perioada de demaraj o secție intervine de $n$ ori în circuit, curentul efectiv care se ia în calcul se determină cu relația:

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{I_1^2 \cdot t_1 + I_2^2 \cdot t_2 + \ldots + I_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \cdots + t_n}}, \qquad (14)$$

în care:

$t_1$, $t_2$ sînt timpii de funcționare a secției de rezistențe în procesul de demaraj;

$I_1$, $I_2$ — curenții corespunzători timpilor $t_1$, $t_2$.

Deci se ia media pătratică a curenților în intervalele respective de timp. Pentru a determina curentul în secția de rezistențe pe trepte de demarare, acesta se apreciază constant și egal cu $I_{med} = \frac{I_{max} + I_{min}}{2}$, în care caz, prin rezistențele de pornire, va circula curentul $I = p.I_{med}$ ($p$ este numărul circuitelor paralele ale motoarelor de tracțiune).

Pentru treptele în care reostatul nu are ramuri paralele, curentul prin secția de rezistențe va fi egal cu $I_{med}$. Pentru cazul ramurilor paralele, curentul total se distribuie pe circuitele paralele proporțional cu conductivitatea ramurii respective și în acest mod se determină curentul căutat în secția de rezistențe care se calculează.

În vederea simplificării calculului curentului efectiv, se admite că timpul de intervenție al fiecărei trepte, pentru același sistem de conexiuni, este egal. În care caz:

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{t_I}{n_I \cdot t} \sum I_I^2 + \frac{t_{II}}{n_{II} \cdot t} \sum I_{II}^2 + \frac{t_{III}}{n_{III} \cdot t} \sum I_{III}^2}, \qquad (15)$$

în care:

$\sum I_I^2$ reprezintă suma pătratelor curenților secțiilor pentru toate treptele primei conexiuni a motoarelor;

$\sum I_{II}^2$, $\sum I_{III}^2$ — idem, pentru conexiunea a doua și a treia;

$t_I$, $t_{II}$, $t_{III}$ — timpii de demaraj pe prima, a doua și pe a treia conexiune;

$n_I$, $n_{II}$, $n_{III}$ — numărul de trepte pentru conexiunile respective, excluzînd treptele de mers fără reostat.

Pentru calcul este suficient să se cunoască raportul timpului de demaraj pe conexiunea respectivă ($t_I$, $t_{II}$, $t_{III}$) față de timpul total de demaraj $t(t = t_I + t_{II} = t_{III})$.

Acest raport poate fi determinat cu relațiile:

$$\frac{t_I}{t} = \frac{V_I}{V}; \quad \frac{t_{II}}{t} = \frac{V_{II} - V_I}{V}; \tag{16}$$

$$\frac{t_I}{t} = \frac{U_I}{U_k}; \quad \frac{t_{II}}{t} = \frac{U_{II} - U_I}{U_k}. \tag{17}$$

Relația (16) definește raportul treptelor de viteză, fără reostat, unde prin $V$ s-a notat viteza treptei superioare.

Relația (17) definește raportul tensiunilor la bornele electromotoarelor.

Determinarea raporturilor de timp conform celor de mai sus presupune aproximația că la toate conexiunile electromotoarelor se admit accelerații egale de demaraj.

Pentru locomotivele cu două conexiuni de electromotoare, relațiile de mai sus devin:

$$t_I = t_{II} = \frac{1}{2} t;$$

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{2}\left(\frac{1}{n_I}\sum I_I^2 + \frac{1}{n_{II}}\sum I_{II}^2\right)}. \tag{18}$$

Pentru locomotivele cu trei conexiuni de electromotoare și raporturi de viteză $\frac{1}{3}V, \frac{2}{3}V, V$:

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{3}\left(\frac{1}{n_I}\sum I_I^2 + \frac{1}{n_{II}}\sum I_{II}^2 + \frac{1}{n_{III}}\sum I_{III}^2\right)}, \tag{19}$$

iar pentru raporturi de viteză $\frac{1}{4}V, \frac{1}{2}V, V$:

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{4n_I}\sum I_I^2 + \frac{1}{4n_{II}}\sum I_{II}^2 + \frac{1}{2n_{III}}\sum I_{III}^2}. \tag{20}$$

Cu ajutorul valorilor lui $I_{ef}$ și a timpului $t$ în care secția de rezistențe este supusă acestei intensități, pe baza tabelelor elaborate de fabricile constructoare se stabilește numărul și tipul elementelor de rezistență.

Pentru precizarea ideilor, în figura 2.49 este redată diagrama unor elemenți de rezistență-tip, din fontă, de fabricație sovietică. Se observă că, spre exemplu pentru o secție de rezistențe supusă timp de 16 min unui curent de 150A, corespunde elementul-tip $N_{64}$ a cărui rezistență ohmică este de 0,0145Ω. Dacă valoarea rezistenței treptei respective este, spre exemplu, 1,45Ω vor trebui adoptate 100 elemente de tipul $N_{64}$ legate în serie.

Întrucît ultimele 2—3 trepte ale fiecărei conexiuni sînt utilizate, în anumite condiții, timp îndelungat, secțiile care alcătuiesc treptele respective se recomandă a fi verificate pentru un curent efectiv $I_{ef}$ de durată corespunzător curentului maxim $I_{max}$ determinat de aderență.

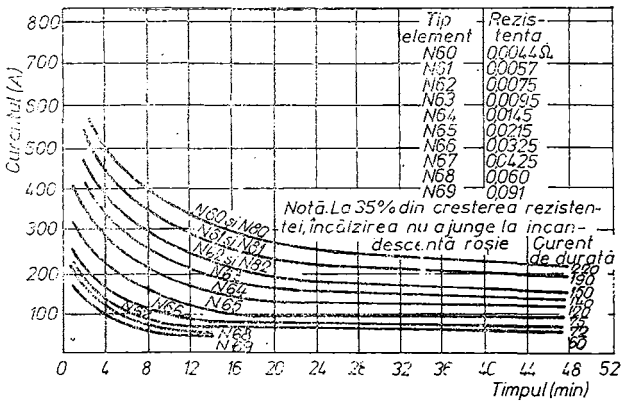



*Fig. 2.49.* Diagrama curenților admisibili ai elementelor de rezistență tip $N$ pentru reostate de pornire la locomotive electrice.

Indicațiile de calcul de mai sus se referă la treptele de demaraj propriu-zise.

Treptele de manevră se verifică pentru curentul inițial cînd $V = 0$, iar treptele auxiliare pentru curentul corespunzător punctului de intersecție a caracteristicii treptei auxiliare respective cu caracteristica economică.

**2.6.3.** *Metoda analitică pentru calculul reostatului.* Presupunem cazul general, un reostat cu $n$ trepte. Din figura 99 rezultă:

$$\overline{AA_1} = \Delta R_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha_1;$$

$$\overline{AA_1} = \Delta R_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha_2;$$

$$\Delta R_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha_1 = \Delta R_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha_2;$$

$$\Delta R_2 = \frac{\Delta R_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \Delta R_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha_1 \cdot \operatorname{ctg} \alpha_2 = \Delta R_1 \frac{V_n'}{R_1'} \cdot \frac{R_1}{V_n} = \Delta R_1 \frac{V_n'}{V_n} \cdot \frac{R_1}{R_1'}.$$

Notînd: $\dfrac{V_n'}{V_n} \cdot \dfrac{R_1}{R_1'} = q,$

rezultă:

$$\Delta R_2 = \Delta R_1 \cdot q.$$

În mod analog:

$$\Delta R_3 = \Delta R_2 \cdot q = \Delta R_1 \cdot q^2$$

$$\Delta R_4 = \Delta R_3 \cdot q = \Delta R_1 \cdot q^3$$

. . . . . .

. . . . . .

. . . . . .

$$\Delta R_n = \Delta R_{n-1} \cdot q = \Delta R_1 \cdot q^{n-1}$$

$$\Delta R_{n+1} = \Delta R_n \cdot q = \Delta R_1 \cdot q^n.$$

Făcînd însumarea, se obține:

$$\Delta R_2 + \Delta R_3 + \ldots + \Delta R_{n+1} = R_1 = \Delta R_1(q + q^2 + q^3 \ldots q^{n-1} + q^n).$$

Valoarea treptelor reostatului va fi următoarea:

— treapta $I$ . . . . . $R_1$;

— treapta $II$ . . . . . $R_2 = R_1 - \Delta R_2$;

— treapta $III$ . . . . . $R_3 = R_2 - \Delta R_3 = R_1 - (\Delta R_2 + \Delta R_3)$;

— treapta $n$. . . . . $R_n = R_1 - \sum_{2}^{n} \Delta R$.

Numărul treptelor reostatului se deduce din relația:

$$R_1 = \Delta R_1(q + q^2 + q^3 + \ldots q^n);$$

$$\Delta R_1 = R_1' - R_1;$$

$$R_1 = (R_1' - R_1)(q + q^2 + q^3 + \ldots + q^n);$$

$$R_1 = (R_1' - R_1)q(1 + q + q^2 \ldots + q^{n-1}).$$

Expresia $1 + q + q^2 + \ldots + q^{n-1}$ fiind o progresie geometrică a cărei sumă este $\frac{1 - q^n}{1 - q}$, rezultă:

$$R_1 = (R_1' - R_1)q.\frac{1 - q^n}{1 - q};$$

$$R_1(1 - q) = q(R_1' - R_1)(1 - q^n);$$

$$R_1 - qR_1' + q^{n+1} \cdot R_1' - q^{n-1} \cdot R_1 = 0;$$

$$q^n \cdot q(R_1' - R_1) = qR_1' - R_1;$$

$$q^n = \frac{qR_1' - R_1}{q(R_1' - R_1)} = \frac{R_1' - \frac{R_1}{q}}{R_1' - R_1};$$

$$n \log q = \log \frac{R_1' - \frac{R_1}{q}}{R_1' - R_1},$$

de unde:

$$n = \frac{\log \frac{R_1' - \frac{R_1}{q}}{R_1' - R_1}}{\log q}.$$

**2.6.4. Exemplu de calcul.** Se va calcula reostatul de pornire și de manevră pentru o locomotivă electrică de curent continuu cu următoarele caracteristici:

— tensiunea la linia de contact: 3 000 V;

— greutatea aderentă: 132 t;

— numărul electromotoarelor: șase, avînd caracteristicile redate în figura 2.50.

— rezistența totală interioară a electromotorului: $r = 0{,}25\ \Omega$

— conexiunile realizate cu cele șase electromotoare serie (toate electromotoarele în serie și deci tensiunea pe motor va fi (500 V), serie-paralel (două grupe a cîte trei motoare în serie, tensiunea pe motor 1 000 V), paralel (trei grupe legate în paralel, fiecare grupă cu două motoare în serie; tensiunea pe motor 1 500 V).

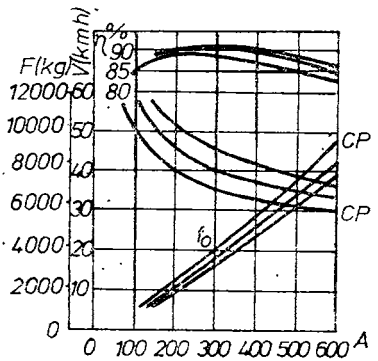



*Fig. 2.50.* Caracteristicile unui motor de tracțiune pentru locomotive electrice de curent continuu.

*a.* Trasarea curbelor $V = f(I)$. În figura 2.51 s-au trasat curbele $V = f(I)$ pentru cîmp plin $CP$ și tensiunile aplicate la motor $U = 1\,500$ V; $U = 1\,000$ V și $U = 500$ V, corespunzînd celor trei conexiuni între motoare.

Curba $V = f(I)$ pentru $U = 1\,500$ V și $CP$ se repetă din fig. 2.50.

Curba $V = f(I)$ pentru $CP$ și $U = 1\,000$ V, respectiv $U = 500$ V, se deduce prin puncte din curba $V = f(I)$ pentru $U = 1\,500$ V cunoscută făcînd aproximația ca $n = \dfrac{U}{k \cdot \Phi}$, adică turația electromotorului respectiv viteza locomotivei, să fie proporțională cu tensiunea aplicată la borne (s-a apreciat că $\Phi = \text{const.}$ în perioada de demaraj și s-a neglijat căderea de tensiune internă $r \cdot I$ față de $U$).

În fig. 2.51 s-a indicat cum rezultă punctele 1′ și 1″ din 1 și anume:

— punctul 1 are coordonatele $x = 200$ A; $y = 40$ km/h;

— punctul 1′ are coordonatele $x = 200$ A; $y' = \dfrac{U'}{U}\, y = \dfrac{1\,000}{1\,500} \cdot y = \dfrac{2}{3} \times 40 = 26{,}6$ km/h.

— punctul 1″ are coordonatele $x = 200$; $y'' = \dfrac{U''}{U}\, y = \dfrac{500}{1\,500} \cdot y = \dfrac{1}{3} \cdot 40 = 13{,}3$ Km/h.

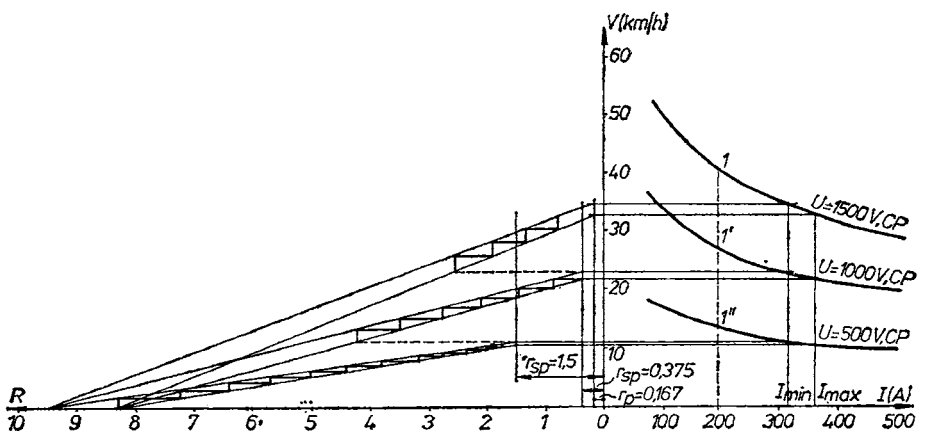



*Fig. 2.51.* Determinarea grafică a treptelor reostatului de pornire.

Restul punctelor curbelor respective se construiesc identic cu punctele 1′ și 1″.

*b.* Determinarea lui $I_{max}$ și $I_{min}$. Forța maximă de tracțiune pentru întreaga locomotivă va fi:

$$F_{max} = 1\,000 \cdot 132 \cdot 0{,}24 = 31.750 \text{ kg}.$$

Forța de tracțiune maximă la obadă, corespunzătoare pe electromotor va fi:

$$F_{0\,max} = \frac{31\,750}{6} = 5\,260 \text{ kg}.$$

În figura 2.50 valoarea $F_0 = 5\,260$ kg de pe curba $F_0 = f(I)$ pentru $CP$, determină $I_{max} = 360$ A.

Valoarea curentului minim va rezulta:

$$I_{min} = 0{,}88 \times 360 = 315 \text{ A}.$$

*c.* Determinarea rezistenței totale interne a electromotoarelor pentru conexiunile serie, serie-paralel și paralel.

Rezistența internă a unui electromotor fiind:

$$r = 0{,}25\Omega,$$

rezultă:

— pentru conexiunea serie a celor șase electromotoare

$$r_s = 6 \times 0{,}25 = 1{,}5\ \Omega;$$

— pentru conexiunea serie-paralel

$$r_{sp} = \frac{3 \times 0{,}25}{2} = 0{,}375\Omega;$$

— pentru conexiunea paralel

$$r_p = \frac{2 \times 0{,}25}{3} = 0{,}167\ \Omega.$$

*d.* Construcția diagramei și stabilirea numărului și a valorilor treptelor reostatice normale. Cu datele calculate la punctele *a*, *b*, *c* s-a trasat diagrama din fig. 2.51, stabilind în prealabil pe $R_1$ și $R_1'$ cu relațiile menționate și anume:

$$R_1' = \frac{3\,000}{316} - r_s = 9{,}5 - 1{,}5 = 8 \text{ (treapta } VII \text{ din tabelul 2.7)}$$

$$R_1 = \frac{3\,000}{360} - r_s = 8{,}33 - 1{,}5 = 6{,}83 \text{ (treapta } VIII \text{ din tabelul 2.7)}$$

Rezultatele calculului grafic sînt concentrate în tabelul 2.7.

Stabilirea treptelor de manevră și a celor auxiliare. Treptele de manevră. Forța de tracțiune necesară deplasării numai a locomotivei este dată de relația:

$$F_{0L} = G_L(r_L + r_a + r_i).$$

în care:

$G_L$ este greutatea aderentă a locomotivei, în $t$;

$r_L = 1{,}4 + 0{,}0012 \cdot V^2 = 1{,}4 + 0{,}0012 \cdot 10^2 = 1{,}52$ kg/t — rezistența specifică de rulare a locomotivei, care se calculează pentru o viteză $V = 10$ km/h;

$r_a = 100 \dfrac{dV}{dt} = 100(0{,}4 \ldots 0{,}6) = 40$ kg/t — rezistența specifică datorită accelerației

$\left(\text{s-a considerat accelerația } \dfrac{dV}{dt} = 0{,}4 \text{ m/s}^2\right)$.

*Tabelul 2.7*

**Numărul și valoarea treptelor reostatului**

| Numărul treptei | Valoarea conform diagramei sau calculului (Ω) | Valoarea rezistenței $R-r$ (Ω) | Valoarea reală a treptei (Ω) | Conexiunea | Felul treptei |
|---|---|---|---|---|---|
| I | 33,15 | 31,60 | 31,60 | Serie | De manevră |
| II | 23,50 | 22 | 22 | | |
| III | 18,15 | 16,65 | 16,65 | | |
| IV | 14,80 | 13,30 | 13,30 | | |
| V | 13 | 11,50 | 11,50 | | |
| VI | 10,80 | 9,30 | 9,30 | | |
| VII | 9,50 | 8 | 8 | Serie | Normale |
| VIII | 8,33 | 6,83 | 6,83 | | |
| IX | 7,25 | 5,75 | 5,75 | | |
| X | 6,40 | 4,90 | 4,90 | | |
| XI | 5,70 | 4,20 | 4,20 | | |
| XII | 5 | 3,50 | 3,50 | | |
| XIII | 4,40 | 2,90 | 2,90 | | |
| XIV | 3,80 | 2,30 | 2,30 | | |
| XV | 3,15 | 1,65 | 1,65 | | |
| XVI | 2,75 | 1,25 | 1,25 | | |
| XVII | 2,35 | 0,85 | 0,85 | | |
| XVIII | 2 | 0,50 | 0,50 | | |
| XIX | 1,75 | 0,25 | 0,25 | | |
| XX | 3,685 | 3,325 | 3,325 | Serie-paralel | Auxiliare |
| XXI | 3,255 | 2,88 | 2,88 | | |
| XXII | 2,695 | 2,32 | 2,32 | | |
| XXIII | 4,25 | 3,875 | 1,94 | Serie-paralel | Normale |
| XXIV | 3,50 | 3,125 | 1,56 | | |
| XXV | 3,00 | 2,625 | 1,31 | | |
| XXVI | 2,75 | 2,375 | 1,19 | | |
| XXVII | 2,10 | 1,725 | 0,86 | | |
| XXVIII | 1,45 | 1,075 | 0,54 | | |
| XXIX | 0,85 | 0,475 | 0,24 | | |
| XXX | 1,447 | 1,28 | 1,28 | Paralel | Auxiliare |
| XXXI | 1,20 | 1,033 | 1,033 | | |
| XXXII | 2,55 | 2,383 | 0,76 | Paralel | Normale |
| XXXIII | 1,98 | 1,813 | 0,605 | | |
| XXXIV | 1,30 | 1,133 | 0,378 | | |
| XXXV | 0,80 | 0,633 | 0,211 | | |

*Observații:*

La conexiunea serie, coloana 3 se calculează scăzînd din valoarea rezistenței date în coloana 2 pe $r_s = 6r = 1{,}5\ \Omega$.

La conexiunea serie-paralel, coloana 3 se calculează scăzînd din valoarea rezistenței date în coloana 2 pe $r_{sp} = \dfrac{3 \times 0{,}25}{2} = 0{,}375\ \Omega$.

La conexiunea serie paralel, coloana 4 se calculează împărțind valoarea rezistenței date în coloana 3, la 2, numai pentru treptele normale; cele auxiliare s-au determinat direct prin calcul.

La conexiunea paralel, coloana 3 se calculează scăzînd din valoarea rezistenței date în coloana 2, pe $r_p = \dfrac{2 \times 0{,}25}{3} = 0{,}167\ \Omega$.

La conexiunea paralel, coloana 4 se calculează împărțind valoarea rezistenței date în coloana 3, la 3, numai pentru treptele normale; cele auxiliare s-au determinat direct prin calcul.

Deci:

$$F_{0L} = 132(1{,}52 + 40) = 5\,490 \text{ kg}.$$

Pe motor revine forța $F_0' = \frac{5\,490}{6} = 915$ kg, căreia în diagrama $F_0 = f(I)$ din fig. 2.50 îi corespunde curentul $I = 90$ A.

Treapta $I$ (de manevră):

$$R_{1m} = \frac{U}{I} - 6r = \frac{3\,000}{90} - 1{,}5 = 33{,}15 - 1{,}5 = 31{,}65\ \Omega;$$

$$i = \frac{I_{min} - I}{n} = \frac{316 - 90}{6} = 37{,}6\ A \ (n = \text{numărul treptelor de manevră}).$$

Treapta a $II$-a (de manevră):

$$R_{2m} = \frac{U}{I + i} - 6r = \frac{3\,000}{90 + 37{,}6} - 1{,}5 = 22\Omega.$$

Treapta a $III$-a (de manevră):

$$R_{3m} = \frac{U}{I + 2i} - 6r = \frac{3\,000}{165{,}2} - 1{,}5 = 16{,}65\Omega.$$

Treapta a $IV$-a (de manevră):

$$R_{4m} = \frac{U}{I + 3i} - 6r = \frac{3\,000}{202{,}8} - 1{,}5 = 13{,}3\ \Omega.$$

Treapta a $V$-a (de manevră);

$$R_{5m} = \frac{U}{I + 4i} - 6r = \frac{3\,000}{240{,}4} - 1{,}5 = 11{,}5\ \Omega.$$

Treapta a $VI$-a (de manevră):

$$R_{6m} = \frac{U}{I + 5i} - 6r = \frac{3\,000}{278} - 1{,}5 = 9{,}3\,\Omega.$$

*Treptele auxiliare.* Pentru prima trecere de la $s$ la $s-p$ se recomandă trei trepte auxiliare, iar de la $s-p$ la $p$ două trepte și de obicei acestea se realizează folosind ultimele trei, respectiv ultimele două trepte de manevră ($R_{4m}$, $R_{5m}$, $R_{6m}$). De la trecerea $s$ la $s-p$, tensiunea se dublează, ramurile în paralel se dublează deci coeficientul de corecție pentru reostat va fi 1/4 și respectiv 1/9 la trecerea paralel.

Valoarea treptelor rezistenței auxiliare pentru trecerea între conexiunea serie și serie-paralel va fi:

$$r_1'' = \frac{1}{4} R_{4m} - r_{sp} = \frac{1}{4} \cdot 14{,}80 - 0{,}375 = 3{,}325\,\Omega \text{ (treapta a } XX\text{-a)};$$

$$r_2'' = \frac{1}{4} R_{5m} - r_{sp} = \frac{1}{4} \cdot 13 - 0{,}375 = 2{,}88\,\Omega \text{ (treapta a } XXI\text{-a)};$$

$$r_3'' = \frac{1}{4} R_{6m} - r_{sp} = \frac{1}{4} \cdot 10{,}8 - 0{,}375 = 2{,}32\,\Omega \text{ (treapta a } XXII\text{-a)}.$$

Valoarea treptelor rezistenței auxiliare pentru trecerea între conexiunea serie-paralel și paralel va fi:

$$r_1''' = \frac{1}{9} R_{5m} - r_p = \frac{1}{9} \cdot 13 - 0{,}167 = 1{,}28\,\Omega \text{ (treapta a } XXX\text{-a)};$$

$$r_2''' = \frac{1}{9} R_{6m} - r_p = \frac{1}{9} \cdot 10{,}8 - 0{,}167 = 1{,}033\,\Omega \text{ (treapta a } XXXI\text{)};$$

În calcul se iau în considerare ultimele trepte de manevră (și nu primele), întrucît ele sînt acelea care conduc la valori de curent mari, aproape de $I_{min}$ și șocul produs este mai mic.

*Observație:* Valorile treptelor, determinate ca în tabelul 2.7, se corectează în plus sau minus atunci cînd se întocmesc schemele circuitelor de forță, ținînd seamă de posibilitățile de combinare ale diverselor secții de rezistențe pentru a obține cu un număr minim de contactoare valori cît mai apropiate de treptele calculate în mod teoretic.

**2.6.5. Eliminarea treptelor de rezistență în perioada de demaraj.** Eliminarea progresivă a reostatului se face în general la comanda conducătorului, supraveghind un ampermetru care măsoară curentul din motoare. La construcțiile mai noi, controlul curentului și trecerea de la o treaptă la alta se face

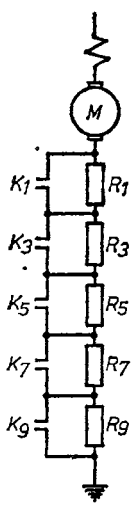



*Fig. 2.52.* Schema de conexiuni pentru comanda reostatului de pornire.

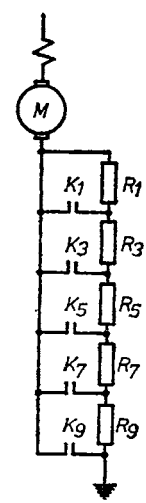



*Fig. 2.53.* Schemă de conexiuni pentru eliminarea treptelor de reostat în perioada de demaraj.

automat sub controlul unui releu de accelerație. Eliminarea rezistențelor din circuit se poate face folosind una din variantele prezentate în figurile 2.52 și 2.53.

În soluția din figura 2.52, închiderea unui contactor elimină numai o singură rezistență ($K_3$ și $K_7$ închiși, elimină din circuit rezistențele $R_3$ și

respectiv $R_7$). Ordinea de închidere a contactoarelor nu este impusă; este posibil să se realizeze orice combinație între rezistențe pentru a obține o valoare dorită; cînd demarajul s-a terminat, toate contactoarele sînt închise și străbătute în permanență de $I_{motor}$ și deci trebuie dimensionate ca atare.

În soluția din figura 2.53, închiderea unui contactor elimină toate rezistențele cuprinse între motor și contactorul respectiv ($K_3$ închis, elimină rezistențele $R_1$ și $R_3$). Ordinea de închidere a contactoarelor se face succesiv începînd dinspre motor și combinarea rezistențelor nu este posibilă; la eliminarea totală a reostatului, rămîne închis numai ultimul contactor și ca atare numai el se dimensionează ca să suporte $I_{motor}$ un timp nedeterminat.

2.6.6. **Construcția reostatului.** În timpul cît reostatul este în circuit, energia electrică este disipată sub formă de căldură. La construcțiile mai vechi reostatul era realizat din elemente de rezistență din fontă care se comportă ca un rezervor de căldură pe care o acumulează repede în timpul funcționării și care se evacuează lent în timpii de repaus. Reostatele moderne sînt realizate din elemente de rezistență din material special (crom-nichel, alcrotal ...) sub formă de bandă lată și grosime redusă care prezentînd o slabă capacitate calorifică necesită a fi ventilat forțat. Un astfel de reostat este mult mai ușor ca cel din fontă (pentru o aceeași locomotivă un reostat de fontă are circa 4 500 kg din care 2 500 kg fontă, iar unul din bandă alcrotal ventilat forțat are circa 1 100 kg din care 350 kg material activ).

2.6.7. **Consumul de energie în reostatul de pornire în perioada de demaraj.** Efectuarea conexiunilor serie, serie-paralel și paralel a rezultat din necesitatea reglării vitezei. Se menționează că trecerea succesivă prin aceste conexiuni conduce și la micșorarea consumului de energie electrică în reostatul de pornire, în perioada de demaraj.

Pentru simplificare, se consideră cazul a două motoare conectate în paralel sub tensiunea $U$ și demarate cu reostat, care se scoate treptat din circuit și este eliminat la sfîrșitul perioadei de demaraj $T$.

Puterea absorbită de cele două motoare în perioada $T$ va fi $2\,UI_p$, iar energia consumată de motoare și de reostat va fi reprezentată de suprafața $OABT$ din figura 2.54.

Considerînd că cele două motoare nu au reostat în circuit puterea absorbită numai de motoare va fi:

$$2(E_c + rI_p)\,I_p, \qquad (1)$$

unde:

$$E_c \cdot I_p = k \cdot n \cdot \Phi \cdot I_p = k'T.$$

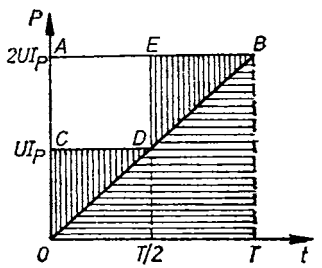



*Fig. 2.54.* Diagrama consumului de energie în perioada de demaraj, pentru cazul a două motoare.

Curentul de pornire $I_p$ este constant în perioada de demaraj, iar fluxul $\Phi$ va fi de asemenea constant, fiind dat de $I_p$. Turația $n = k_1 V$ și $V = k_2 T$, deoarece accelerația este considerată constantă în perioada de pornire $\left(\frac{dV}{dt} = const\right)$.

Neglijînd căderea de tensiune $2r \cdot I_p$, reprezentarea grafică a ecuației (1) este o funcție lineară de $T$, adică dreapta $OB$.

Suprafața $OTB$ haşurată va reprezenta consumul de energie în motoare în perioada de demaraj $T$, iar suprafața $OAB$ va reprezenta consumul de energie în aceeași perioadă în reostatul de pornire.

Presupunînd că în perioada $T/2$, cele două motoare sînt cuplate în serie fiecare va avea la borne tensiunea $U/2$, iar puterea absorbită de cele două motoare va fi:

$$2\frac{U}{2} I_p = U \cdot I_p.$$

Suprafața $OCDT/2$ reprezintă energia consumată în reostat şi în motoare în perioada $T/2$ cînd motoarele sînt cuplate în serie; suprafața $OCD$ reprezintă energia consumată în reostat, iar suprafața $ODT/2$ energia consumată în motoare.

În restul perioadei, de la $T/2$ la $T$, conectînd motoarele în paralel, printr-un raționament analog rezultă că suprafața $T/2\ DBT$ reprezintă energia consumată în motoare, iar suprafața $DEB$ energia consumată în reostat.

Din cele expuse rezultă că, demarînd motoarele în paralel şi cu reostat, în perioada $T$ în reostat se consumă energia reprezentată de suprafața $OAB$; în timpul $0 \cdots T/2$, funcționînd cu motoarele în serie, iar în restul timpului $T/2 \ldots T$ funcționînd cu ele în paralel, în reostat de consumă energia reprezentată prin suprafețele $OCD + DEB$, adică față de prima situație se economisește energia reprezentată de suprafața $CAED$, aproximativ jumătate din consum.

Pentru cazul unei locomotive cu patru motoare, conectate în serie, serie-paralel şi paralel, pe perioadele $T/4$, $T/2$, $T$, consumul de energie în motoare este reprezentat prin suprafața haşurată orizontal, iar în reostatul de pornire consumul de energie este reprezentat prin suprafețele haşurate vertical, din figura 2.55.

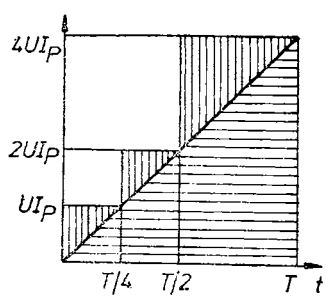



*Fig. 2.55.* Diagrama consumului de energie în perioada de demaraj, pentru cazul a patru motoare.

În concluzie, metoda trecerii prin conexiunile serie, serie-paralel şi paralel, utilizată pe locomotivele de curent continuu, oferă posibilitatea obținerii diverselor tensiuni la bornele motoarelor din care rezultă caracteristicile de tracțiune $F(V)$ respective, dar este impusă şi din punctul de vedere al consumului minim de energie electrică în reostatul de pornire.

## 2.7. SERVICIILE AUXILIARE

Principalele funcții auxiliare ce trebuie asigurate necondiționat pentru buna funcționare a locomotivei sînt următoarele:

— producerea aerului comprimat;

— ventilarea forțată a motoarelor de tracțiune, reostat de pornire, reostat de frînare ...;

— încălzirea electrică a trenului și a locomotivei;
— alimentarea circuitelor de comandă, servicii proprii ale locomotivei încărcarea bateriei de acumulatori ...

2.7.1. **Schema electrică a circuitelor serviciilor auxiliare.** În figura 2.56 s-a reprezentat schema de principiu pentru realizarea circuitelor serviciilor auxiliare.

Toate motoarele care antrenează diversele agregate ale serviciilor auxiliare sînt de tip serie și supuse la tensiunea liniei de contact (3 sau 1,5 kV), ceea ce constituie un mare neajuns al acestor locomotive. Pentru conectarea și deconectarea fiecărui circuit se prevede un contactor ($K$), protecția se asigură prin siguranță fuzibilă $F$, iar pentru demararea și limitarea curentului la pornire a acestor motoare în circuitul respectiv se introduce cîte o rezistență de limitare ($R_l$) care rămîne în permanență în circuit.

Căderea de tensiune în rezistența de limitare nu depășește 3 ... 5% din tensiunea liniei de contact la curentul nominal al motorului, ceea ce practic nu are influență asupra funcționării motorului.

Această metodă de demarare se aplică de regulă la motoarele a căror putere nominală nu depășește 20 kW.

Pentru motoarele serviciilor auxiliare cu putere mai mare de 20 kW, demararea se face cu două rezistențe de limitare în circuit ($Rl_1 + Rl_2$), iar după pornire se scurtcircuitează rezistența $R_{l2}$ și motorul lucrează numai cu rezistența $R_{l1}$ în circuit.

2.7.2. **Grupul moto-ventilatoarelor** ($M—V$). Acest grup este constituit dintr-un motor care antrenează un ventilator, de obicei de tip centrifugal, ce absoarbe aer din atmosferă și îl refulează, prin tuburi de tablă dimensionate în consecință, asupra motoarelor de tracțiune, rezistențelor de demaraj și reostatului de frînare, servind la răcirea forțată a acestora.

În general, grupurile moto-ventilatoare de pe locomotive se realizează cu un motor și cu două ventilatoare montate pe același ax, de o parte și de alta a motorului. Numărul agregatelor se stabilește după consumul de aer necesar răcirii forțate.

De regulă numărul agregatelor $M—V$ este par, în care situație se pot lega cîte două în serie pentru a micșora la jumătate tensiunea pe ele (se ameliorează comutația). Protecția se poate completa cu un releu diferențial ce compară tensiunile celor două motoare în serie și care declanșează întrerupătorul principal cînd un motor este avariat.

Dacă se notează:

$D$ — debitul ventilatorului, în $m^3/s$;

$H_0$— presiunea totală a ventilatorului, în mm $H_2O$;

$\eta$ — randamentul ventilatorului (valori recomandate $\eta = 0{,}4 \ldots 0{,}55$); atunci puterea motorului de antrenare va fi:

$$P = \frac{D \cdot H}{102\eta} [\text{kW.}]$$

Debitul ventilatorului se calculează cu relația:

$$D = K\,(m \cdot Q_1 + Q_2) \ [\text{m}^3/\text{s}],$$

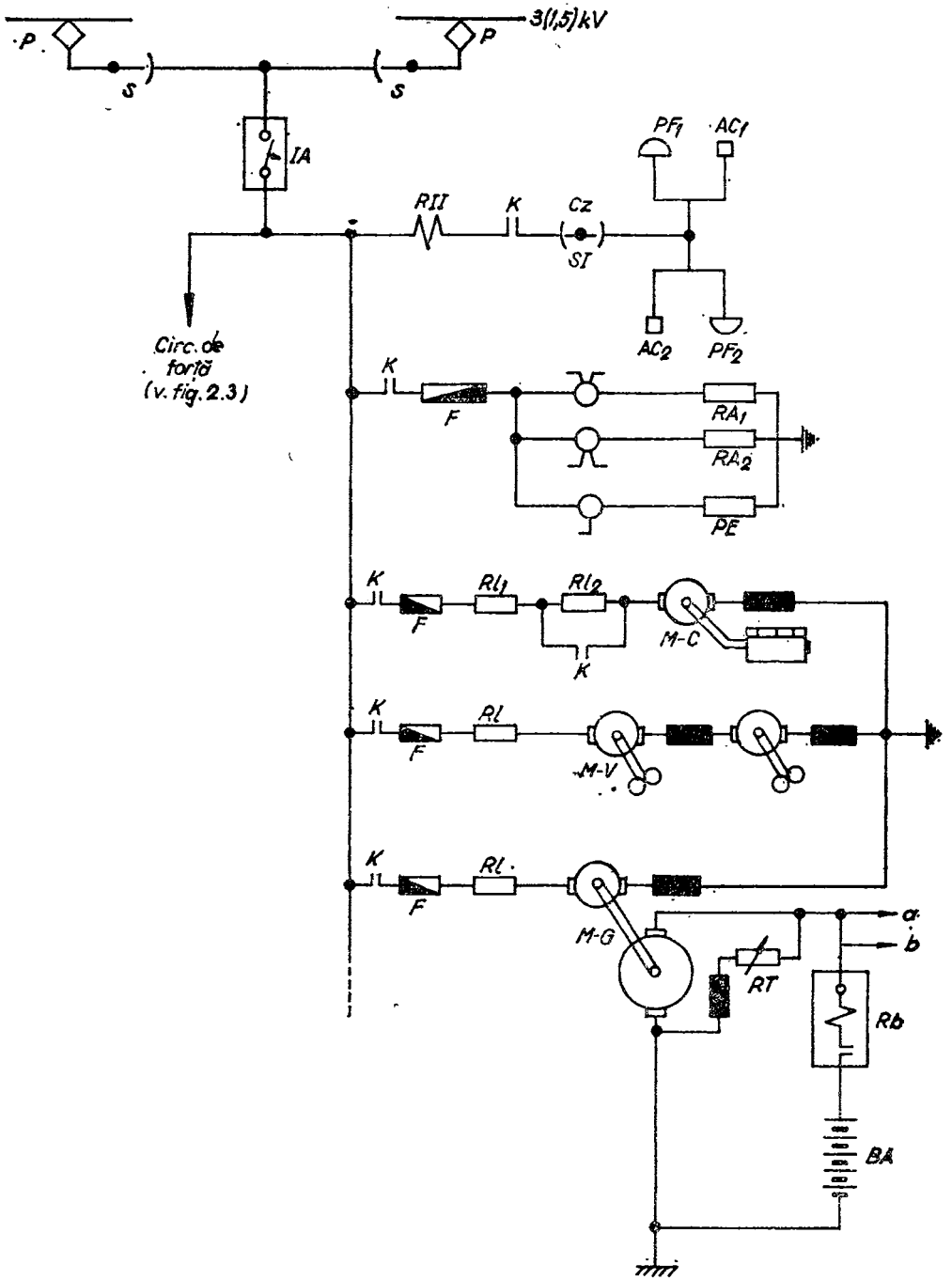



*Fig. 2.56.* Schema circuitelor serviciilor auxiliare.

în care:

$Q_1$ este debitul de aer necesar răcirii unui motor de tracțiune, în $m^3/s$ (valori recomandate $Q_1 = 70 \ldots 100$ $m^3/min$);

$m$ — numărul de electromotoare;

$Q_2$ — debitul de aer necesar răcirii rezistențelor, în $m^3/s$;

$K$ — coeficientul pentru pierderi ($K = 1{,}15 \ldots 1{,}20$).

Presiunea totală a ventilatorului se stabilește cu relația:

$$H = H_{st} + \gamma \frac{v^2}{2g} [\text{mmH}_2\text{O}],$$

în care:

$H_{st}$ este presiunea statică, în mm $H_2O$;

$\frac{v^2}{2g}$ — presiunea dinamică, în mm $H_2O$ ($g = 9{,}81$ $m/s^2$ — accelerația gravitației);

$v$ — viteza fluidului, în m/s;

$\gamma$ — greutatea specifică a fluidului, în $kg/m^3$.

Puterea motoarelor ventilatoarelor se situează, de regulă între 10 ... ... 15 kW.

Pe unele locomotive, pentru ventilarea reostatului de demaraj și de frînare nu se folosesc grupuri moto-ventilatoare separate ($M - V$, fig. 2.56), ci o soluție ameliorată constă în a lega moto-ventilatoarele pentru reostat pe o secție fixă a reostatului de pornire eliminată odată cu ultima treaptă a fiecărei conexiuni a motoarelor, astfel că viteza ventilatoarelor variază cu intensitatea (curentul) din reostat și nu mai apare necesar aparataj suplimentar de comandă a ventilatoarelor. O asemenea soluție, aplicată pe unele locomotive existente, este redată schematic în figura 2.57.

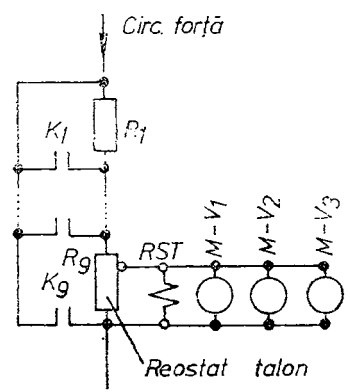



*Fig. 2.57.* Schema alimentării motor-ventilatoarelor pentru răcirea reostatului de pornire.

Ca indicații practice, motorul de antrenare are parametrii 55 V — 50A — 2,2 kW, iar ventilatorul 2,9 $m^3/s$ debit și 57 mm coloană apă presiune. Protecția grupurilor moto-ventilatoare este asigurată de un releu de supratensiune *RST* legat pe rezistența talon, care provoacă deschiderea întrerupătorului automat în caz de suprasarcină în reostat (supraturație a grupurilor) sau dacă intempestiv tensiunea 3000 (1500) din linia de contact s-ar aplica la bornele grupurilor (dacă de exemplu s-ar rupe rezistența talon).

2.7.3. **Grupul motor-compresor (M—C).** Aerul comprimat pe locomotive folosește pentru frînarea și pentru deservirea diverselor comenzi electropneumatice. Compresoarele pot fi de tip cu piston sau de tip rotativ.

Ca debit și presiune se întîlnesc în general următoarele tipuri:

— pentru locomotive electrice puternice, debitul ajunge pînă la 2 500 ... ... 3 000 l/min și chiar mai mult, la presiunea de 8 ... 10 at;

— pentru automotoare, debitul ajunge pînă la 7 00 l/min, la presiunea de 7 ... 8 at;

— pentru tramvaie, debitul ajunge pînă la 400 l/min, la presiunea de 5 ... 7 at.

Motorul poate antrena compresorul fie direct (acuplare directă), în care caz trebuie să aibă turație de 500 ··· 750 rot/min, fie prin intermediul unui reductor de viteză, în care caz turația motorului poate fi de 1 000 ··· ... 1 500 rot/min. Puterea necesară motorului de antrenare se poate aprecia la circa 0,8 ... 1,1 kW pentru 1 000 l/min și 1 at.

Pornirea și oprirea compresoarelor este automatizată pe un contactor ($K$) a cărui comandă este pusă sub dependența unui presostat ce lucrează între 8—10 atm.

2.7.4. **Grupul convertizor de tensiune (M—G).** Pentru alimentarea circuitelor de comandă, a serviciilor proprii ale locomotivei și pentru încărcarea bateriei de acumulatoare este necesar a avea pe locomotivă o sursă de curent continuu de joasă tensiune, în mod curent de 48 ... 72 ... 110 V.

În acest scop se utilizează grupul moto-generator $M$—$G$ care funcționează în tampon ca bateria de acumulatoare $BA$.

Generatorul de curent continuu este cu excitație derivație; în circuitul de excitație se introduce un regulator automat de tensiune $RT$ care menține tensiunea la borne cu o precizie de 1,5 ... 3% la orice variație a turației motorului de antrenare produsă de fluctuațiile tensiunii în linia de contact.

Pentru încărcarea bateriei de acumulatoare la parametrii tehnici prescriși, între generator și baterie se introduce releul $R_b$ care controlează încărcarea.

Bateria de acumulatoare este folosită pentru alimentarea circuitelor de comandă și a serviciilor proprii $a$, $b$ (iluminat, încălzirea parbrizului cabinelor mecanicului) în cazul cînd locomotiva staționează și pantograful este coborît și pentru acționarea unui electrocompresor mic, care asigură aerul necesar pentru ridicarea pantografului după întreruperi care au dus la pierderea aerului din rezervorul principal.

Convertizorul de tensiune rotativ, este o soluție greoaie și complicată. În prezent sînt elaborate și se experimentează soluții mai noi cu convertizori statici continuu-continuu 3 000 (1500)/110 V cu tiristori.

2.7.5. **Circuitele de încălzire electrică a vagoanelor de călători și a locomotivei.** Circuitul de încălzire electrică a vagoanelor de călători (fig. 2.56) comportă un contactor ($K$) pentru comanda circuitului, prizele fixe $PF_1$, $PF_2$ (cîte una la fiecare capăt al locomotivei), prizele de acuplare $AC_1$, $AC_2$ ale cablelor flexibile (cîte una la fiecare capăt) prin care se asigură continuitatea circuitului cînd sînt două locomotive în capul trenului; asemenea prize existînd și la capetele vagoanelor. Protecția circuitului la suprasarcini este asigurată prin releul de sarcina $RII$ care dă comanda de deschidere a întrerupătorului principal, în caz de suprasarcină. Contactorul $K$ are o condiționare în sensul că nu primește comandă de acționare atîta timp cît o cheie de înzăvorîre din „cutia de chei înzăvorîre" ($CZ$) nu se află la cutie;

această cheie permite introducerea sau scoaterea fișelor cablului flexibil de acuplare în prizele *AC*. Aceasta este o măsură de siguranță pentru personalul care cuplează vagoanele. În aceeași cutie *CZ* este și un separator de izolare (*SI*) care se deschide cînd personalul lucrează la aparatajul de înaltă tensiune în locomotivă, ca să nu existe riscul de a băga tensiunea de încălzire, în ipoteza preîncălzirii trenului de la un post fix.

Instalația de încălzire a vagoanelor se realizează fie prin radiatoare electrice montate în compartimente, cabine, culoare ... (soluție mai veche), fie prin baterie electrică centrală care servește la încălzirea aerului care se refulează în vagon (aer pulsat sau aer condiționat).

Puterea instalată pentru încălzirea unui vagon de călători admis în traficul internațional este de 35 ... 40 kW, rezultînd din condiția de a asigura + 20° în interior la o temperatură de —30°C în exterior.

Normele internaționale (fișa *UIC*-552) prescriu tensiunea de încălzire 1,5 sau 3 kV pentru locomotivele de curent continuu, după caz.

Încălzirea cabinelor mecanicului din locomotivă se face prin rezistențele electrice $RA_1$, $RA_2$ ale aerotermelor respective și plita electrică *PE*.

## 2.8. ÎNTOARCEREA CURENTULUI DE TRACȚIUNE

Curentul de tracțiune se întoarce (închiderea circuitului) prin șine la polul negativ al substației. În acest scop, polul negativ al circuitelor de pe locomotivă se leagă la o „bară comună de legare la pămînt", bine fixată din punct de vedere galvanic, la șasiul cutiei. Curentul de retur ajunge la șină prin legături electrice naturale între cutie-boghiuri (pivoți, sprijiniri laterale, suspensie ...) și boghiuri-roți (cutii de unsoare). Această soluție poate provoca încălziri și scînteieri între anumite organe; este aplicată, de regulă, la vehicule electrice motoare la putere mică.

În figura 2.58 se prezintă dispoziția generală adoptată pe unele locomotive de curent continuu magistrale. Cutiile de osie sînt izolate față de cadrul boghiului, iar curentul circulă prin cablele de legătură (cupru 50 mm²) de la șasiul cutiei și cadrul boghiului în capetele osiilor prevăzute cu dispozitive (perii) de frecare. Sensul de curgere a curentului s-a figurat cu săgeată plină. Acest circuit normal este dublat de un circuit de siguranță care intră în funcțiune în cazul unei avarii pe circuitul normal (șunturile desfăcute de la capacele cutiilor de osii, contact de frecare defect ...), în care situație cutia locomotivei se poate pune sub tensiunea liniei de contact.

Circuitul de siguranță, care utilizează legătura electrică naturală (cutia de osie-cuzinet-osie) comportă un releu de curent ($RI_0$) a cărei anclanșare dă comandă de deschidere a întrerupătorului principal și se semnalizează defectul; circuitul mai cuprinde și rezistențele $R_1$ ... $R_4$ existente în fiecare legătură care fac ca în situație normală curentul să treacă pe circuitul normal. Valoarea acestor rezistențe sînt de circa 0,8 Ω fiecare în cazul locomotivelor Bo—Bo și 1,2 Ω la locomotivele Co—Co.

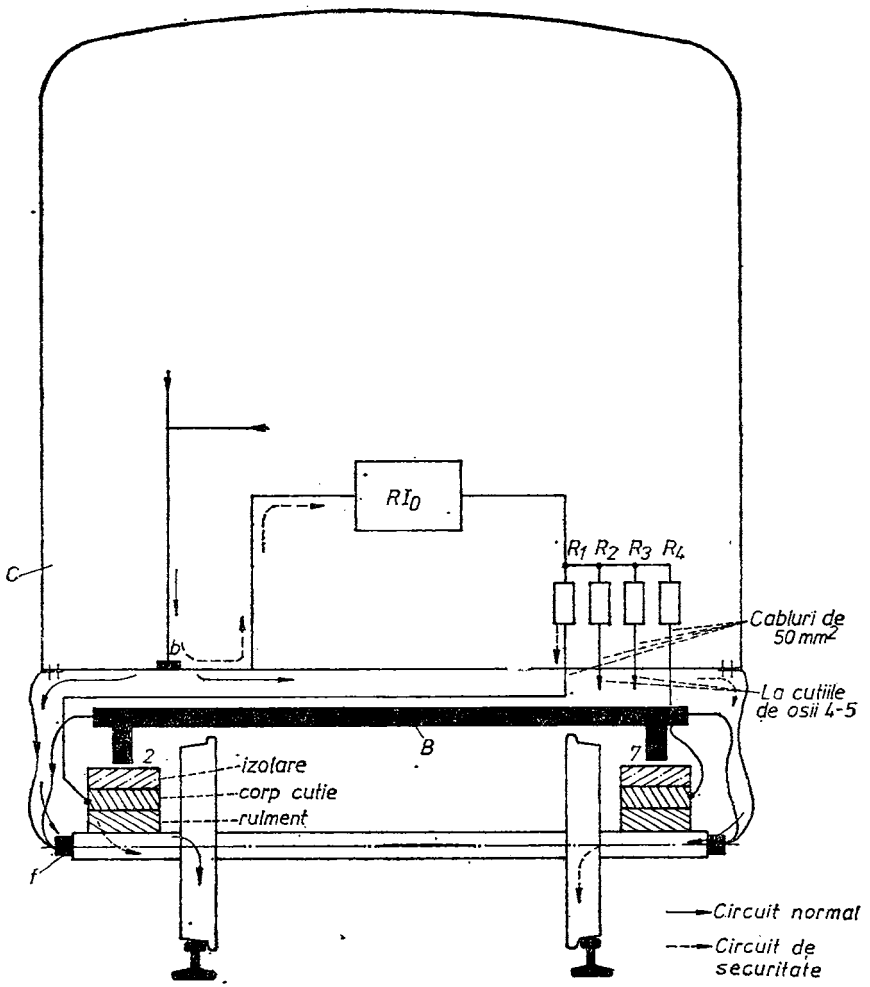



*Fig. 2.58.* Dispoziția circuitului de întoarcere a curentului de tracțiune : *C* — cutia locomotivei ; *B* — cadrul boghiului ; *b* — bara de legare la pământ ; *f* — dispozitiv de frecare din capul osiei.

## 2.9. APARATAJ ȘI PROTECȚII DE BAZĂ

O locomotivă electrică dispune de o mare diversitate de aparate și echipamente necesare realizării circuitelor de forță, a serviciilor auxiliare, acționări, reglări, protecții, semnalizări, înzăvorîri ... Problema aparatajului și echipamentelor (construcție, funcționare, montare ...) este o specialitate inginerească aparte (nu face parte din lucrarea de față) de aceea, în cele de mai jos, se vor trata în mod simplificat numai cîteva echipamente specifice materialului rulant motor electric și unele noțiuni despre aparatajul

folosit frecvent în scopul înțelegerii alcătuirii schemelor și a circuitelor de comandă și protecție.

Aparatajul de pe locomotivele electrice poate fi împărțit în mai multe grupe și anume:

— captatoare de curent (pantografele);

— aparataj de comutare (întrerupătoare automate, contactoare inversor de mers ...);

— aparataj de comandă (butoane, controlere, manipulator, graduator, servomotoare ...);

— aparataj de protecție, măsură și semnalizare (automate, descrescătoare, relee, lămpi de semnalizare, ampermetre, voltmetre, watmetre, contoare ...).

2.9.1. **Captatorul de curent (pantograf).** Toate locomotivele și ramele electrice preiau curentul prin contact de la linia de contact (linie electrică aeriană). Un asemenea mod de preluare a curentului se întîlnește și la tramvai și la troleibuz. La metrouri captarea curentului se face în mod obișnuit prin „șina a treia"; unele vehicule electrice speciale (locomotive de mină) captează curentul prin inducție. În cele de mai jos se tratează soluția clasică de captare a curentului prin pantograf.

Pantograful, denumit și captator de curent, este dispozitivul situat pe acoperișul locomotivei și care servește la preluarea curentului de la firul de contact.

Orice locomotivă electrică se prevede cu două pantografe. În exploatare normală lucrează numai cu un singur pantograf, cel din spate în sensul de mers, din condiții de securitate în caz de avarie în linia de contact care ar putea smulge o parte din pantograf și acesta ar deteriora aparatajul de pe acoperiș și din considerente de a se micșora presiunea aerodinamică asupra pantografului. În unele situații mai dificile (demaraje în rampe care ar necesita curenți exagerați, polei pe firul de contact ...) pot fi folosite și ambele pantografe. Prin acest contact alunecător—o plăcuță de frecare pe un fir rotund de contact, deci suprafață de contact extrem de redusă — se alimentează motoarele locomotivei care împreună adesea au o putere care depășește mai multe mii de cai putere. Acest lucru este posibil tocmai prin alunecarea contactului, care nu dă posibilitatea încălzirii mereu în același punct.

În condițiile actuale de viteze sporite care se cer în tracțiunea electrică, în traficul de călători tinzîndu-se spre viteze de ordinul a 160 ... 200 km/h, captarea curentului trebuie să se facă în mod corect.

Viteza de circulație de 160 km/h, a locomotivei corespunde ordinului de mărime al vitezei unei perii pe colectorul unei mașini electrice, însă o linie de contact este departe de a avea regularitatea unui colector. Cu toate precauțiile constructive, o linie de contact nu poate prezenta o elasticitate constantă nici chiar în cuprinsul unei deschideri dintre doi stîlpi. De asemenea, sania pantografului trebuie să urmărească riguros toate denivelările firului de contact. Datorită presiunii aerului, acesta este supus și efectelor aerodinamice. Aceste cîteva considerente evidențiază faptul că este greu de comparat modul de culegere al unui pantograf cu cel al unei perii fixate printr-o port-perie legată rigid la rîndul ei de o carcasă de motor și explică marea complexitate a acestei probleme, care aparent pare simplă.

Construcția unui pantograf trebuie realizată astfel încît să satisfacă următoarele cerințe de bază:

— captarea curentului să se realizeze la deplasarea locomotivei cu viteză, fără ruperea contactului; este de menționat că între două puncte de fixare (la doi stîlpi consecutivi) firul de contact are o săgeată, pantograful trebuie să aibă posibilitatea unei deplasări ușoare pe verticală, uneori cu accelerații mari.

— uzura firului de contact și respectiv a plăcuței de frecare să fie redusă la minimum;

— pantograful să exercite asupra firului de contact o presiune suficientă și pe cît posibil constantă, pentru a realiza un contact bun în toate condițiile de exploatare și de viteză, presiune care trebuie să rămînă în același timp destul de scăzută, pentru ca uzura pieselor în frecare să fie mică.

2.9.1.1. *Construcția pantografului.* În exploatare există o mare varietate de modele, care au evoluat din punct de vedere constructiv în funcție de viteza mereu crescîndă a locomotivelor electrice. Indiferent de tip un pantograf face parte fie din categoria pantografelor clasice (pantograf simetric — fig. 2.59), fie din categoria pantografelor cu gabarit redus (pantograf asimetric — fig. 2.60).

Părțile constructive principale ale unui pantograf sînt următoarele (fig. 2.61):

— șasiul (*1*), care se sprijină pe acoperișul locomotivei prin intermediul a patru izolatoare-suport (2);

— sistemul articulat deformabil, constituit din bare articulate (*3*, *4*) care asigură aplicarea saniei pe firul de contact în limitele de lucru ale pantografului (conform fișei *U.I.C.* — *OR*—606 înălțimea minimă de lucru a pantografului este 4 550 mm, iar înălțimea maximă de lucru este 6 500 mm);

— arcușul sau sania (*5*) pe care se fixează plăcuțele de frecare (*6*);

— resoartele de lucru (*7*), care asigură mișcarea sistemului articulat și presiunea de contact;

— mecanisul de comandă (*8*) care permite, după voie, urcarea sau coborîrea pantografului.

Sistemul articulat este constituit din:

— doi arbori de comandă orizontali (*0*) cu rotire în paliere solidare cu șasiul;

— patru bare inferioare (*3*) fixate la extremitățile arborilor de comandă;

— patru bare superioare (*4*) articulate cu un capăt la barele inferioare, iar la cealaltă extremitate suportă sania pantografului;

— diagonale și antretoaze pentru asigurarea rigidității sistemului articulat;

— bielete de conjugare (*b*), articulate la extremități, avînd manetoanele (*m*) solidare cu arborii de comandă și care impun arborilor de comandă rotații egale.

Cu această dispoziție constructivă se asigură rotirea barelor inferioare articulate cu unghiuri egale, dar de sens contrar, iar articulațiile se mențin la același nivel și deplasarea saniei pe verticală se face cu menținerea aceluiași plan pe orizontală paralel cu șasiul pantografului.

Mișcarea sistemului articulat este dată de arcuri elicoidale de lucru (*7*), la care se aplică tensiunea prin manivele solidare cu arborii de comandă.

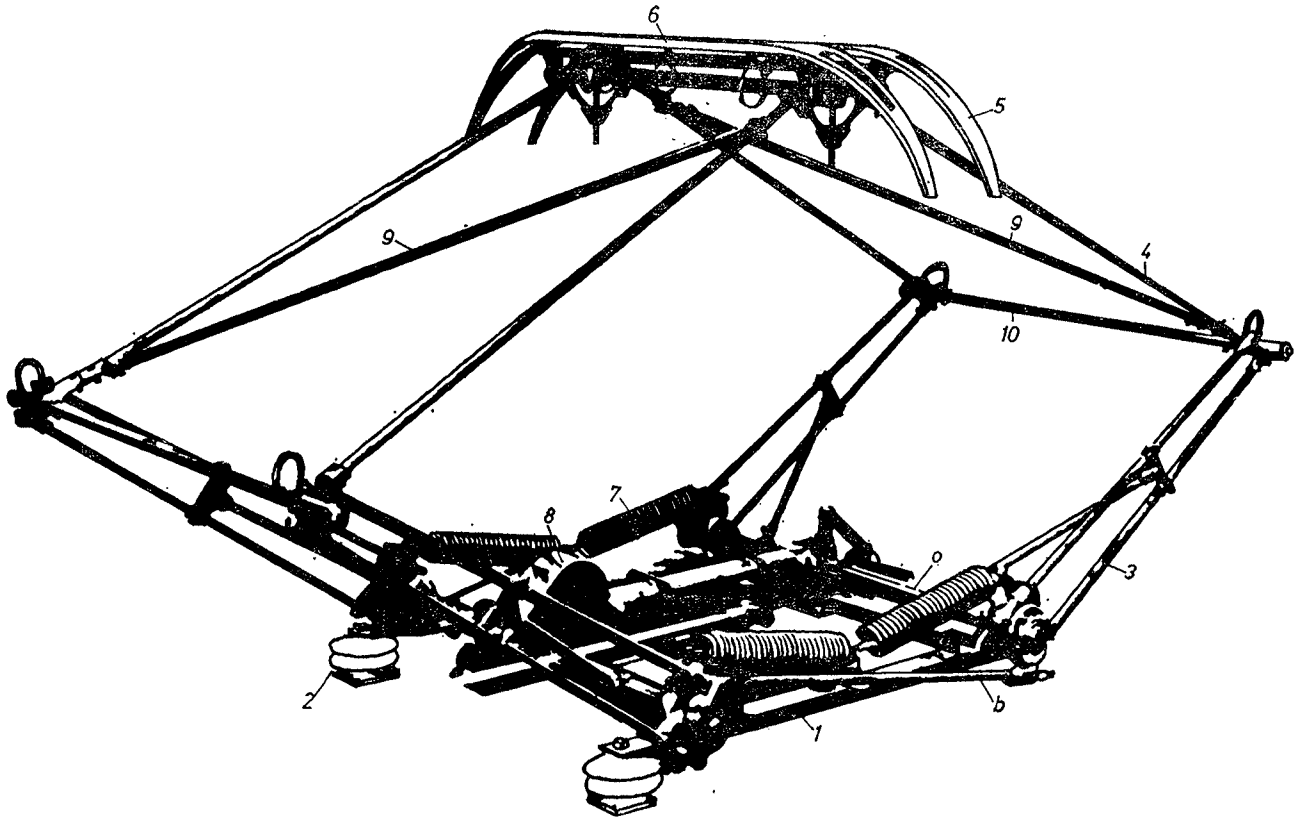



*Fig. 2.59.* Ansamblul unui pantograf de tip simetric (clasic) : *1* — saşiu ; *2* — izolatori suport ; *3, 4* — bare articulate ; *5* — sanie ; *6* — plăcuţa de frecare ; *7* — arcuri de lucru ; *8* — mecanism de comandă ; *9, 10* — diagonale şi antretoaze de întărire ; *a* — arbori de comandă ; *b* — bieletă de conjugare.

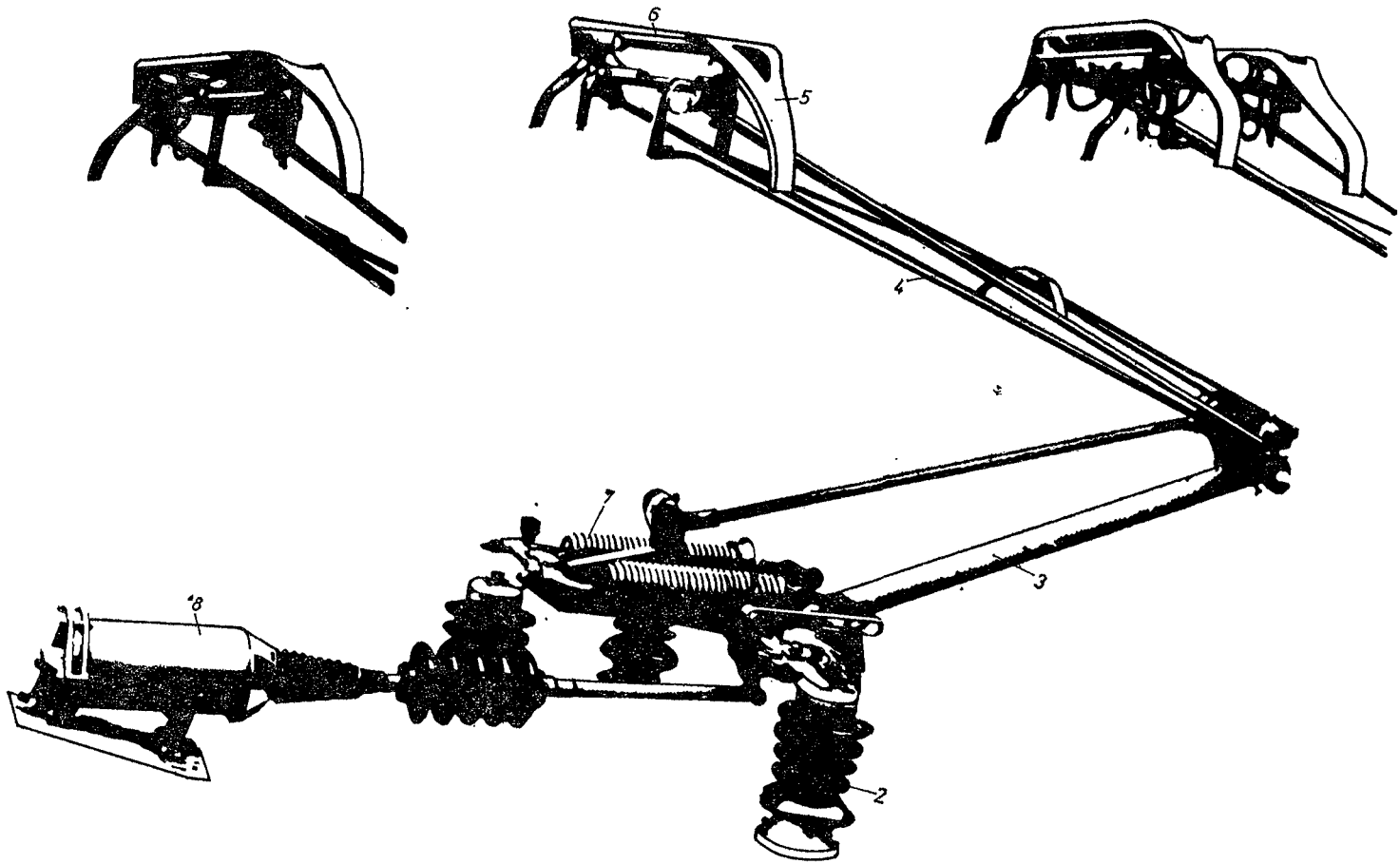



*Fig. 2.60.* Ansamblul unui pantograf de tip asimetric (Specificația notațiilor, idem ca la fig.2.59).

Sania pantografului (5) este fixată elastic la partea superioară a sistemului articulat. Profilul său este executat cu partea centrală rectilinie sau cu o curbură mică şi terminat la fiecare extremitate prin două părţi curbe numite

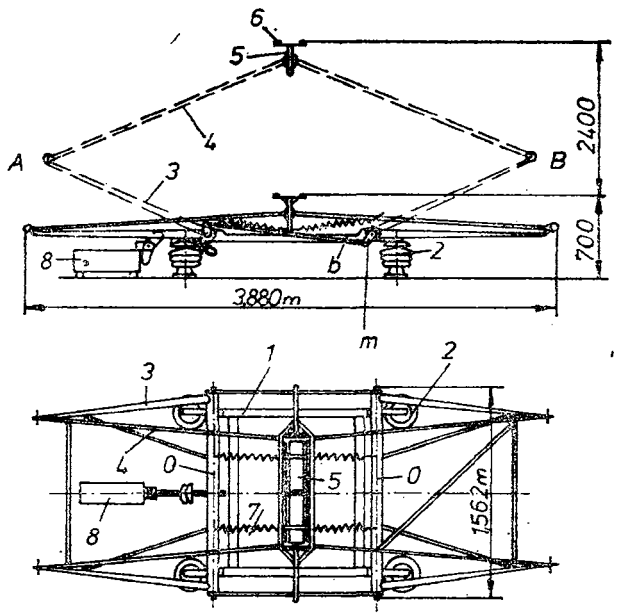



*Fig. 2.61.* Schema constructivă a unui pantograf simetric.

coarne şi care asigură ghidajul şi urcarea firului de contact la ace. Dimensiunile, forma şi modul de fixare a saniei variază după natura curentului, caracteristicile geometrice ale liniei de contact şi după gabaritul oferit de lucrările de artă.

Elementele şi dispoziţia constructivă a saniei pantografului sînt reprezentate în schema din figura 2.62.

Majoritatea pantografelor sînt construite avînd sania realizată după unul din profilurile prezentate în figura 2.63.

În cazul locomotivelor de curent alternativ monofazat 16 2/3 Hz, 15 kV sau 50 Hz, 25 kV, valoarea maximă a curentului captat nu depăşeşte 300 A, ceea ce permite realizarea pantografului cu o singură sanie şi cu două linii de bare de uzură.

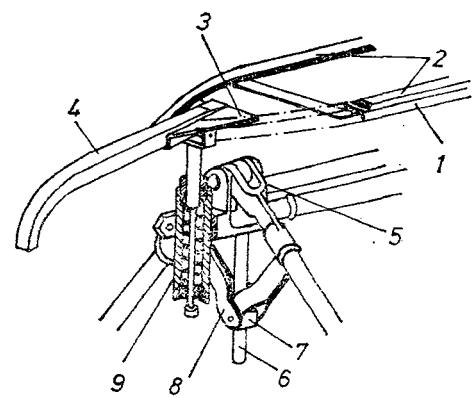



*Fig. 2.62.* Schema constructivă a saniei pantografului: *1* — talpa saniei; *2* — plăcuţe de frecare; *3* — palier de fixare; *4* — corn; *5* — articulaţia superioară a cadrului; *6* — tijă oscilantă (menţine sania orizontală); *7* — nucă; *8* — bieletă cu furcă; *9* — cilindru cu resort.

În cazul locomotivelor de curent continuu, intensitatea captată este de mii de amperi, ceea ce impune realizarea părții superioare a pantografului cu două sănii, fiecare cu cîte două linii de bare de uzură. De altminteri, aceasta este singura deosebire între un pantograf pentru locomotive de curent continuu și unul pentru locomotive de curent alternativ.

Plăcuța de frecare (*6*) este amovibilă și se fixează pe sanie, de regulă, prin șuruburi cu cap înnecat. Ea poate fi o bară metalică din oțel, cupru,

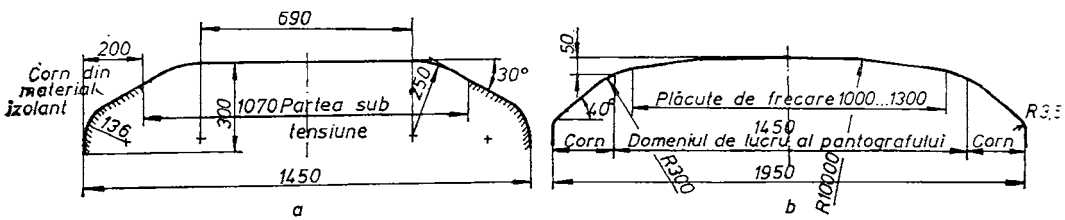



*Fig. 2.63.* Profil de sanie pentru pantografe (după norme U.I.C.—fișa 606) : *a*—pentru pantograf tip 1450; *b* — pentru pantograf tip 1950.

aluminiu, sau din cărbune. Plăcuța metalică admite curenți mari și în mers și în repaus, însă uzează mai mult firul de contact, motiv pentru care se construiește cu o renură în care se pune periodic unsoare grafitată pentru ungere. Plăcuța de grafit uzează mai puțin de firul contact, însă din cauza rezistenței electrice mari nu admite curenți de valoare ridicată. Aceasta impune precauții deosebite în cazul folosirii plăcuței de grafit la locomotivele de curent continuu 1 500 V, cînd se efectuează încălzirea trenului, în timpul staționării. În această situație pantograful preia un curent mare dintr-un punct fix de contact, lucru care poate conduce la topirea firului de contact nemaibeneficiindu-se în această situație de deplasarea plăcuței. Plăcuța de frecare din grafit este fragilă și reclamă o linie de contact bine rodată și în stare perfectă.

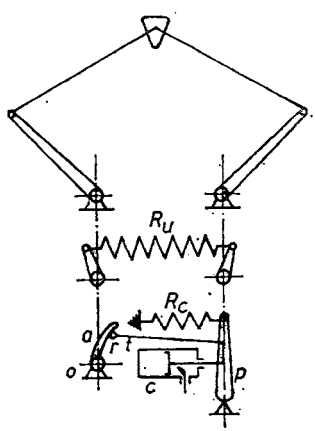



*Fig. 2.64.* Schemă cinematică a dispozitivului de comandă a unui pantograf.

2.9.1.2. *Mecanismul de comandă.* Acesta asigură, după voința mecanicului, urcarea sau coborîrea pantografului cu ajutorul unui dispozitiv cu aer comprimat. Diversele tipuri diferă prin metoda utilizată pentru coborîrea pantografului, la toate ridicarea fiind asigurată prin aer comprimat. Pentru coborîre, actualmente se utilizează numai următoarele sisteme: coborîre prin punerea în acțiune a unor arcuri; coborîre prin gravitatea sistemului articulat; coborîre prin arc și gravitatea sistemului articulat.

Un sistem de comandă a pantografului folosit uzual la locomotive este indicat în schema cinematică reprezentată în figura 2.64.

Ridicarea se face cu aer comprimat și sistem de resoarte de lucru, iar coborîrea se face eliminînd aerul comprimat din cilindru și acționînd greutatea proprie a pantografului și a unui arc de coborîre. La admiterea

aerului comprimat în cilindrul (*c*), pistonul se deplasează spre stînga, pîrghia (*p*) se rotește în sens contrar acelor ceasornicului și arcul de coborîre $R_c$ se armează (comprimă și forța lui de a se opune urcării, slăbește), tija (*t*) obligă rola (*r*) din capul său să se plimbe pe profilul camă (*a*) care rotește arborele de comandă (*o*); sub acțiunea arcurilor de urcare ($R_u$) pantograful „urcă". Aerul comprimat este menținut în cilindru în tot timpul cît pantograful se află în poziția „ridicat" (pistonul își face cursa și se oprește la finele ei indiferent de înălțimea de lucru a pantografului). La evacuarea aerului comprimat din cilindru de comandă, sub acțiunea arcului de coborîre $R_c$ (puternic armat la urcare) și a greutății proprii, acțiunea arcului $R_u$ este învinsă și pantograful „coboară".

Mecanismele de comandă sînt în general fixate pe șasiul pantografului, deci sub tensiune. În curent continuu, fiind vorba de tensiune redusă, legătura dintre cilindrul de aer al mecanismului și conducta de aer comprimat a locomotivei se realizează printr-un racord flexibil de cauciuc, suficient pentru a asigura și izolarea necesară.

În curent alternativ (15 ... 25 kV), este imperios necesar să se intercaleze între conducte și cilindru un racord izolant la nivelul tensiunii respective. La ultimele construcții, această problemă se rezolvă fixînd mecanismul motor direct pe acoperiș, deci legat la masă, iar transmiterea mișcării se face prin intermediul unei biele izolate (vezi figura 2.60).

2.9.1.3. *Pantograf cu dimensiuni gabaritice reduse.* Pantografele de format clasic prezintă inconvenientul de a avea dimensiuni în plan mari. În scopul ușurării ansamblului pantograf și al reducerii costului, în ultima vreme (din 1956) se recurge la un model de pantograf alcătuit tot dintr-un sistem articulat, însă mai simplu și asimetric (pantograf asimetric).

Masa pantografului are o influență deosebită asupra calităților dinamice, în special în domeniul vitezelor mari. Datorită acestui fapt, jumelînd pantograful clasic s-a ajuns la această formă.

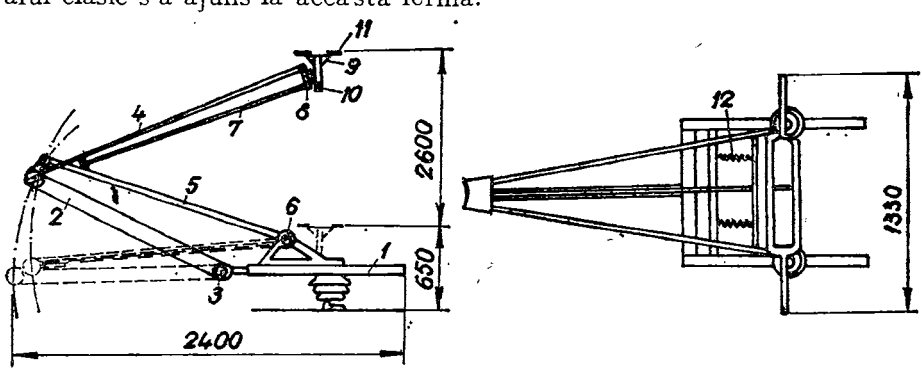



*Fig. 2.65.* Schemă constructivă a unui pantograf asimetric.

În figura 2.60 este prezentat ansamblul unui pantograf asimetric tip *AM*, iar în figura 2.65 același pantograf schematizat cu indicarea dimensiunilor de gabarit.

Părțile esențiale ale pantografului asimetric sînt următoarele:

— un arbore de comandă care se rotește în două paliere fixate pe șasiu (*3*);

— un braț inferior solidar cu arborele de comandă (*2*);

— un cadru superior articulat la extremitatea brațului inferior (*4*);

— o bieletă de împingere, articulată la un capăt pe un punct fix pe șasiu, iar la celălalt capăt articulată pe un palier al cadrului (*5*); această bieletă reglează poziția cadrului în funcție de unghiul de rotație a brațului;

— o bieletă de poziție a saniei (*7*), articulată cu un capăt pe un maneton fixat la extremitatea bieletei de împingere, iar cu celălalt capăt la extremitatea unei manivele calată pe arborele-suport al saniei. Această bieletă menține planul de contact orizontal în mișcarea verticală a saniei.

Dispozitivul de ridicare prin arcuri, suspensia saniei pantografului și mecanismul de comandă sînt de aceeași concepție ca cele ale unui pantograf clasic.

Pantograful asimetric (cunoscut și sub denumirea de tip Faiveley, după numele firmei constructoare) este asimetric din punct de vedere geometric însă simetric din punct de vedere aerodinamic și ca atare poate fi utilizat fără restricții în ambele sensuri de mers. Rezistența sa la înaintare este mai mică decît a pantografului clasic, iar dimensiunile sale reduse permit fixarea lui pe acoperiș numai pe trei izolatoare. O comparație privind dimensiunile de gabarit și masa, între un pantograf clasic și unul asimetric rezultă din figura 2.66.

Datele constructive și curenții admisibili ai pantografelor asimetrice de construcție Faiveley sînt indicate în tabelele 2.8 și 2.9.

Datele din tabelul 2.9 se referă și la pantografele de construcție clasică. Pentru pantografele înzestrate cu două sănii, datele din tabelul 2.9 cu pri-

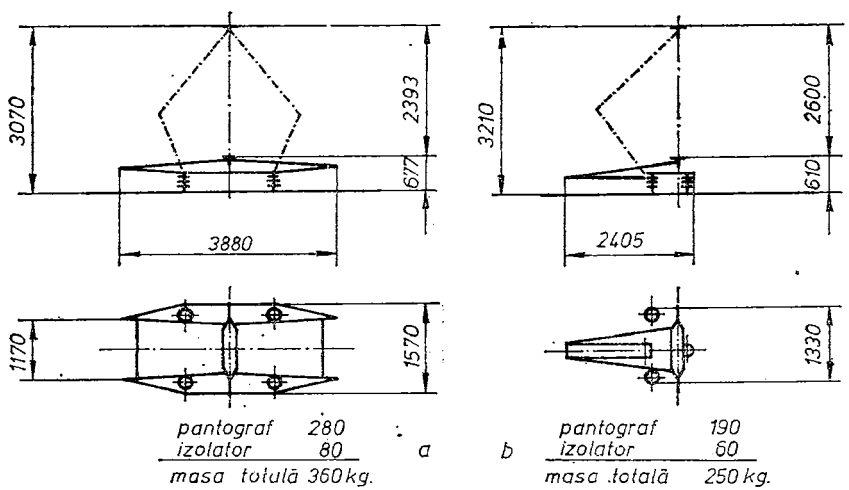



*Fig. 2.66.* Comparație privind gabaritul și greutățile între un pantograf clasic — — simetric și asimetric (ambele pentru curent alternativ) : *a* — pantograf clasic tip MT ; *b* — pantograf asimetric tip AM 18U.

vire la intensitatea curentului captat se dublează. Curenții indicați în tabelul 2.9 se înțeleg pentru o durată de 10 ... 15 minute. Vîrful de curent timp de un minut, la mare viteză, se poate mări cu 150% față de valoarea din tabel.

La demaraj, deci la viteze reduse, valoarea curentului captat trebuie considerată 80% din cea indicată.

*Tabelul 2.8*

**Date constructive ale pantografelor asimetrice Faiveley**

| Tipul pantografului | Numărul săniilor | Tensiunea la firul de contact (kV) | Înălțimea de ridicare (m) | Înălțimea pantografului în repaus (m) | | Greutatea inclusiv cea a izolatoarelor kg |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | cu plăcuțe metalice | cu plăcuțe din grafit | |
| AM-BU | 1 | 25 | 2,46 | 0,629 | 0,647 | 210 |
| AM-BB | 2 | 1,5 · · · 3 | 2,48 | 0,440 | 0,458 | 230 |

*Tabelul 2.9*

**Curenți admisibili ai pantografului pentru diferite construcții ale saniei**

| Caracteristica liniei de contact | Plăcuțe de grafit | | | | | Plăcuțe metalice (OL, Cu, aliaje) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Numărul de plăcuțe | Lățimea plăcuței (mm) | Curent cules (A) | | | Numărul de plăcuțe | Lățimea plăcuței (mm) | Curent cules (A) | | |
| | | | Nominal | Uniorar | De scurtă durată | | | Nominal | Uniorar | De scurtă durată |
| Un fir de contact | 2 | 30 | 250 | 375 | 500 | 2 | 25 | 400 | 600 | 800 |
| | 2 | 40 | 335 | 500 | 675 | 4 | 25 | 675 | 1 000 | 1 350 |

2.9.1.4. *Condiții tehnice și funcționale.* Pantograful trebuie să asigure la toate vitezele contactul permanent al saniei pe firul de contact și în același timp uzura care rezultă la cele două elemente în contact (firul și plăcuța de frecare) să fie cît mai redusă.

Modul de captare a curentului este influențat de numeroși factori, care sînt independenți de construcția propriu-zisă a pantografului, ca sistemul de suspensie a liniei de contact, starea de întreținere, natura firului de contact, calitățile de rulare ale vehiculului și starea căii. Zăpada, chiciura și poleiul înrăutățesc mult transferul curentului. Forma cutiei locomotivei și mai ales peretele frontal joacă un rol deosebit asupra dispersiei aerului, care influențează mersul liniștit al pantografului.

Cu toate măsurile speciale ce se iau la construcția liniei de contact în vederea regularizării elasticității ei pe toată distanța, nu este posibil a realiza o elasticitate absolut constantă, rămînînd „puncte tari" în suspensie mai ales în dreptul stîlpilor, la ace, la joncțiunile zonelor de ancorare, în dreptul cărora există tendința de desprindere a pantografului. Această tendință se accentuează cu creșterea vitezei, a presiunii de contact a pantografului și a inerției sistemului articulat.

Calitatea contactului este deci legată intim de caracteristicile constructive ale pantografului și ale suspensiei catenare, care trebuie să fie perfect adaptate și care nu pot fi tratate separat.

În ceea ce privește pantograful, el trebuie să răspundă la următoarele condiții privind securitatea funcționării și a captării curentului:

— plan de contact independent de mișcările sistemului articulat;

— inerție redusă a sistemului articulat;

— stabilitate laterală mare;

— presiune statică de contact constantă indiferent de înălțimea de lucru;

— sensibilitate mică la efectele dinamice ale aerului;

— forma și suspensia saniei adaptate la caracteristicile suspensiei catenare;

— mecanism de comandă sigur în funcționare.

*a. Planul de contact al saniei.* Mișcările sistemului articulat nu trebuie să modifice, atît la urcare cît și la coborîre, orientarea planului de contact al saniei. Pentru aceasta, traiectoria fiecărui punct de articulație sau de fixare a saniei pe sistemul articulat trebuie să fie o dreaptă perpendiculară pe planul de fixare a pantografului.

Suspensia saniei joacă un rol important în construcția pantografului, ea compensează micile denivelări ale firului de contact și cuplul datorat frecărilor. La pantografele de mare viteză, soluția de fixare (suspensie) a saniei pe cadrul mobil al sistemului articulat trebuie să asigure acesteia cel puțin două grade de libertate: în plan vertical și în sensul de mers.

În figurile 2.67 și 2.68 se prezintă schematic două soluții de suspensie a saniei:

— suspensia independentă (fig. 2.67), caracterizată prin aceea că atunci cînd punctul de acțiune al forței $F$ (acțiunea și reacțiunea dintre pantograf și firul de contact) nu mai este în axul de simetrie al saniei (de exemplu $F_1$ la extremitatea zigzagului inclusiv abaterea suspensiei datorită vîntului), aceasta se înclină cu o cantitate ce depinde de valoarea lui $F_1$ și poziția acesteia;

— suspensia conjugată (fig. 2.68), caracterizată prin aceea că independent de valoarea forței $F_1$ și poziția ei pe sanie, aceasta se deplasează paralel cu ea însăși.

Din cauza simplității constructive se preferă soluția suspensiei independente. Fixarea propriu-zisă a saniei pe sistemul articulat se face elastic folosind arcuri elicoidale sau cilindri pneumatici.

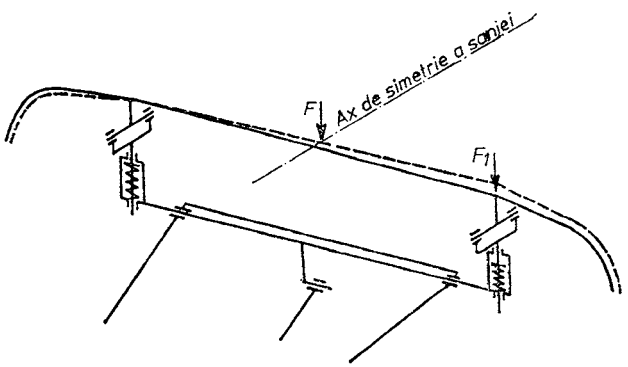



*Fig. 2.67.* Schema unei suspensii independente a saniei pantografului: — poziția saniei sub acțiunea forței $F$; ····· poziția saniei sub acțiunea forței $F_1$.

*b. Inerția sistemului articulat.* Pentru a putea urmări deformațiile și denivelările firului de contact, sistemul articulat trebuie să aibă o inerție cît mai mică posibil. Această inerție, care depinde de masa sistemului articulat, are o influență directă asupra amplitudinilor de deformare a suspensiei catenare. Masa fiecărui element trebuie să se reducă pe măsura apropierii ei

de planul de contact. În figura 2.69 se observă că, pentru o deplasare ($E$) a saniei, corespund deplasări pe verticală mai mici ale centrelor de greutate ale barelor superioare ($e_1$) și inferioare ($e_2$).

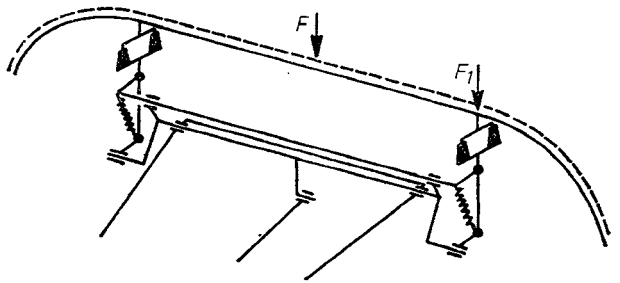



*Fig. 2.68.* Schema unei suspensii conjugate a saniei pantografului.

Barele inferioare trebuie să fie robuste, deci au masă mare, pentru a rezista accelerațiilor transversale, însă au influență mică asupra inerției sistemului articulat datorită deplasării reduse a centrului lor de greutate.

Masa fictivă statică a sistemului mobil al unui pantograf se determină deconectînd resorturile de lucru și măsurînd, cu ajutorul unui dinamometru, forța ce trebuie aplicată saniei pentru a asigura urcarea și coborîrea sistemului articulat, ca în figura 2.70.

Masa fictivă dinamică $M_f$ a sistemului mobil se determină prin măsurarea perioadei de oscilație $T$, cu ansamblul sistemului mobil suspendat de un resort de rigiditate $\gamma$, după relația:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M_f \cdot \gamma}{g}}.$$

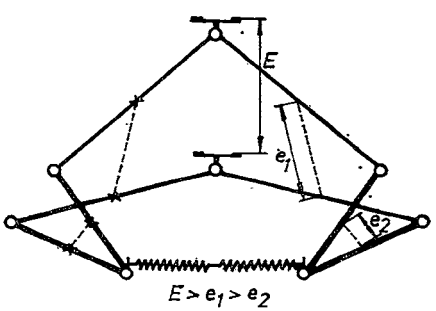



*Fig. 2.69.* Deplasări relative ale elementelor sistemului mobil al pantografului.

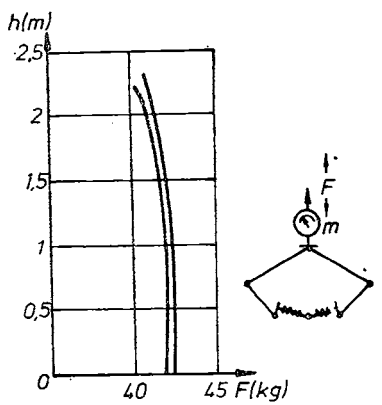



*Fig. 2.70.* Masa fictivă statică a sistemului mobil al unui pantograf: $F$ — forța de aplicat saniei; $m$ — dinamometru; $u$ — urcare pantograf; $c$ — coborîre pantograf; $h$ — înălțimea de lucru a pantografului.

Masa fictivă dinamică se ia în considerare pentru a cerceta influența greutății pantografului asupra captării și ridicării suspensiei catenare.

*c. Stabilitatea laterală.* Jocul lateral al unui pantograf este provocat de oscilațiile locomotivei și el trebuie limitat, întrucît diminuează spațiul de

siguranță între sanie și părțile laterale în lucrările de artă. Rigiditatea transversală a pantografelor se obține prin brațele inferioare, arborele de comandă, și, la nevoie, prin întăriri cu diagonale și antretoaze.

În diagrama din figura 2.71 sînt date jocurile laterale pentru diverse soluții constructive de rigidizare a pantografului.

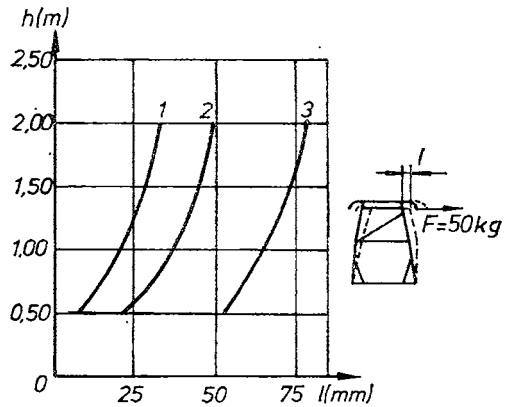



*Fig. 2.71.* Jocul transversal al unui pantograf: *1* — pantograf normal; *2* — diagonale și antretoaze suprimate pe o parte; *3* — fără diagonale și antretoaze.

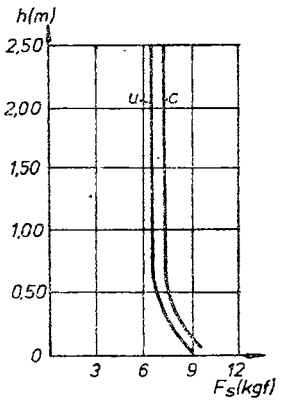



*Fig. 2.72.* Caracteristica statică a unui pantograf.

*d. Forța statică și dinamică de contact.* Forța statică de contact ($F_s$) se definește ca forța de apăsare a pantografului pe firul de contact, măsurată în axa saniei în stare statică. Presiunea constantă pe toată înălțimea de lucru a pantografului se obține prin dispozitivele constructive ale pantografului. Curba care arată variația presiunii de contact în funcție de cursa pantografului ($h$) definește așa-numita *„caracteristică statică a pantografului"*.

Pentru construcții recente, caracteristica este redată în diagrama din figura 2.72.

Conform recomandărilor *U.I.C.* — fișa 606, forța statică este cuprinsă între 6 și 8 kg. Pentru pantografele bipaletă $F_s = 10 \ldots 15$ kgf.

Caracteristica notată cu *„u"* se referă la urcarea pantografului, iar curba *„c"* este caracteristica statică la coborîre. Ele diferă datorită frecărilor din articulații (la urcare forța de frecare din articulații se opune forței create de arcurile de lucru, iar la coborîre acționează în sens invers). Cu cît cele două caracteristici sînt mai apropiate cu atît pantograful este mai de calitate și apropierea lor se obține introducînd rulmenți la articulații.

Cînd vehiculul motor electric circulă, din cauza elasticității neuniforme a suspensiei catenare, firul de contact se deformează sub acțiunea forței din pantograf, iar denivelările firului de contact (care trebuie urmărite de pantograf) antrenează o deplasare pe verticală a masei sistemului articulat care provoacă o variație a forței de contact, proporțională cu masa și accelerația mișcării ($M.a$) care, după sens, se adaugă sau se scade din valoarea forței statice.

Forța de contact reală ($F_c$) devine:

$$F_c = F_s \pm Ma.$$

Considerînd o deformație sinusoidală a firului de contact între două puncte de fixare (la stîlpi), ceea ce cu suficientă exactitate este valabil în practică (fig. 2.73), valoarea maximă a accelerației pantografului pe verticală va fi: $\omega^2 e$, unde $\omega = \frac{2\pi}{T}$, iar $T$ reprezintă timpul necesar de parcurgere a distanței între doi stîlpi de susținere succesivi.

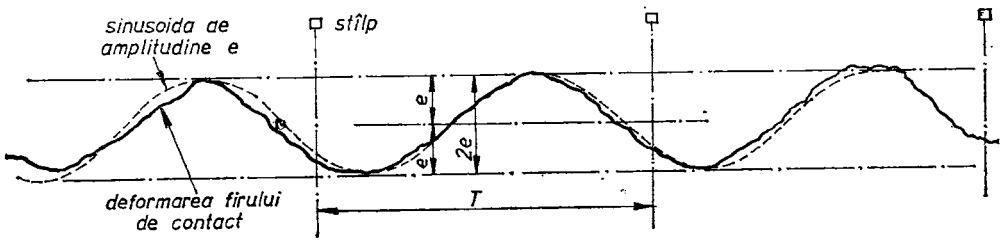



*Fig. 2.73.* Deformația dinamică sinusoidală a firului de contact.

Valorile externe ale forței de contact vor fi

$$F_c = F_s \pm M\omega^2 e.$$

Pentru a evita ca forța de contact minimă să nu atingă valoarea critică — $M\omega^2 e \geqslant F_s$ și pantograful să se desprindă, este necesar să se prevadă o mărire a forței de contact proporțională cu pătratul vitezei ($KV^2$), o forță de corecție, în care caz:

$$F_c = F_s + KV^2 \pm M\omega^2 e.$$

Reprezentarea grafică a acestei ecuații este redată în diagrama din figura 2.74.

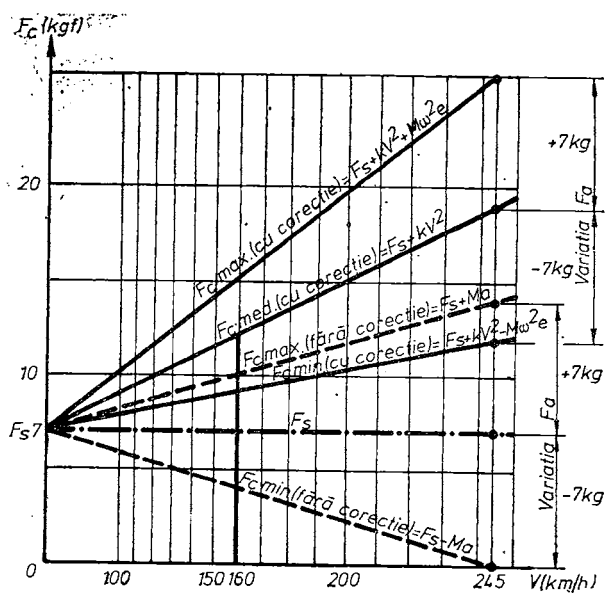



***Fig. 2.74.*** **Variația forței de contact și a forței de corecție.**

Analizînd relația forței de contact rezultă că la viteze mari, este necesar a folosi pantograf de masă mobilă cît mai mică (masa fictivă mică, adică masa sistemului articulat redusă la punctul de contact) și o catenară care să prezinte mici amplitudini de deformație a firului de contact.

În mers, presiunea vîntului asupra pantografului dă o componentă aerodinamică ce depinde de pătratul vitezei (este de forma forței de corecție $KV^2$) care adăugată la forța statică dă o rezultantă denumită forța aerodinamică de contact:

$$F_a = F_s + KV^2.$$

Componența aerodinamică ($KV^2$) nu poate fi determinată analitic, întrucît este greu de stabilit legea de variație a efectelor aerodinamice în funcție de viteză pe fiecare element al pantografului. Valoarea ei depinde de concepția pantografului, poziția pantografului pe acoperiș și forma cutiei locomotivei. Forța aerodinamică se determină experimental, iar recomandările *UIC* — fișa 606 prevăd ca $F_a$ să fie de ordinul 12 kgf la $V = 160$ km/h (vezi $F_{c\,med}$ cu corecție la $V = 160$ km/h pe diagrama fig. 2.74); $K$ — coeficient aerodinamic ($K = 0{,}0005$ pentru locomotive de curent continuu; $K = 0{,}0002$ pentru locomotive de curent alternativ).

Componenta aerodinamică este influențată de viteza locomotivei și direcția vîntului (se compune geometric cu viteza locomotivei) ceea ce modifică valoarea lui $F_a$. La unele locomotive de mare viteză (peste 160 km/h) și de construcție mai pretențioasă (unele locomotive japoneze) se prevăd instalații speciale pentru realizarea forței de corecție $KV^2$ dependentă de viteza vehiculului; o schemă de principiu este redată în figura 2.75.

*e. Securitate în funcționare.* Mecanismul de comandă trebuie să asigure, la viteza maximă constructivă a locomotivei, urcarea și coborîrea pantografului într-un timp bine definit, precum și menținerea lui în poziția coborît. Dispozitivul de coborîre prin resorturi prezintă o mai mare securitate în funcționare.

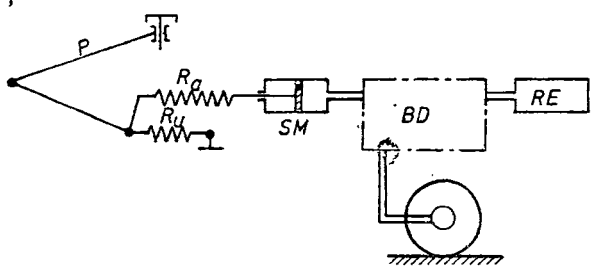



*Fig. 2.75.* Schema de principiu pentru realizarea forței de corecție: *BD* — bloc de comandă acționat de tahogeneratorul fixat pe osie; *RE* — rezervor de energie; *SM* — servomotor de acționare; $R_a$ — arc auxiliar.

Securitatea în funcționare se controlează prin măsurarea forței ce trebuie aplicată saniei pentru ridicare sau pentru menținerea lui în cursa de coborîre, cilindrul de comandă fiind în legătură cu atmosfera.

Diagrama controlului securității în funcționare este redată în figura 2.76.

Viteza de urcare trebuie reglată pentru a evita salturile arcușului pe firul de contact. Coborîrea trebuie să asigure o desprindere rapidă a arcușului, însă amortizată către finele cursei pentru a evita șocuri asupra acoperișului

locomotivei. Partea haşurată din diagramă reprezintă zona de securitate la coborîre.

În tabelul 2.10 sînt redate caracteristicile cîtorva tipuri de pantografe moderne folosite pe locomotive şi automotoare electrice.

*Tabelul 2.10*

**Caracteristicile unor pantografe moderne**

| Tip | Utilizare | Sanie | $F_s$ (kgf) | Masa sist. articulat. (kgf) | Greut. totală (kgf) (cu mecanism şi izolatori) |
|---|---|---|---|---|---|
| Clasic G | C.C — 1,5 kV | bipaletă | 9 | 68 | 425 |
| MT | C 1—25 kV/50 Hz | unipaletă | 7 | 44 | 360 |
| Asimetric: | | | | | |
| $AM_{11}$ | C 1—25 kV/50 Hz | unipaletă | 7 | 32 | 312 |
| $AM_{18B}$ | cc — 1,5 kV | bipaletă | 9 | 50 | 270 |

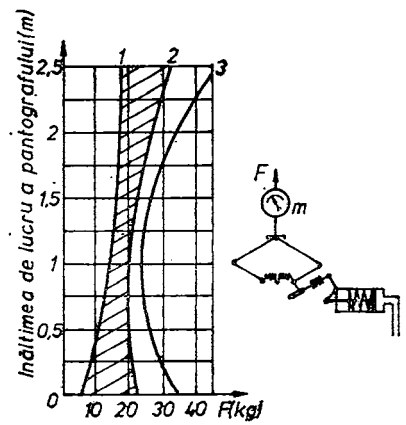



*Fig. 2.76.* Diagrama securităţii în funcţionare a unui pantograf reglat static la $F_s = 7$ kgf: *1* — curba variaţiei forţei pe sanie datorită aerului la $V_{max}$; *2* — curba variaţiei forţei de menţinere a pantografului la coborîre; *3* — curba variaţiei forţei necesare la urcare.

2.9.2. **Butoane de comandă.** Butonul de comandă este un aparat prin care se dă comandă de la distanţă unui aparat de acţionare. Ele se amplasează, de regulă, pe pupitrul mecanicului. Schema constructivă a unui buton de comandă este redată în figura 2.77, *a*.

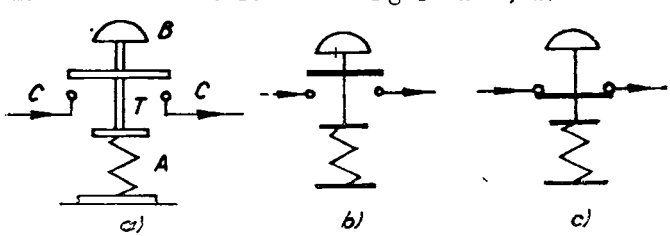



*Fig. 2.77.* Buton de comandă, reprezentare schematică: *a* — elementele componente (*B* — capul butonului; *A* — arc; *C* — contacte; *T* — tije; *b* — buton de comandă cu contact normal deschis; *c* — buton de comandă cu contact normal închis.

Un buton de comandă poate fi normal deschis (fig. 2.77, *b*) cînd contactele se închid prin apăsarea butonului, sau normal închis (fig. 2.77, *c*) cînd contactele sînt închise tot timpul cît butonul nu este apăsat.

Cînd se doreşte conectarea şi deconectarea unui aparat prin alimentarea sau tăierea alimentării bobinei de comandă *(b)* a aparatului respectiv se

folosesc două butoane (unul normal deschis și altul normal închis) ca în schema din figura 2.78.

Comanda de închidere se dă prin apăsarea lui $B_1$, cînd bobina *(b)* primește tensiune și aparatul comandat „închide" și totodată își închide și blocontactul direct *(c)*; la eliberarea lui $B_1$ aparatul rămîne închis în continuare fiindcă bobina sa *(b)* primește tensiunea pe calea $1—c—2—B_2—3$.

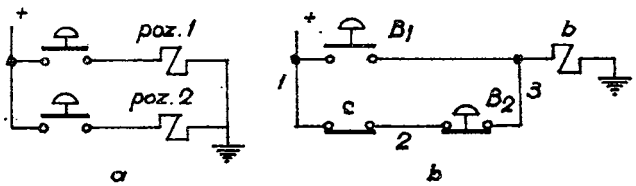



*Fig. 2.78.* Schema de comandă închidere — deschidere a unui circuit, prin două butoane (normal deschis — normal închis).

Aparatul se deschide cînd bobina *(b)* pierde tensiunea, adică atunci cînd se apasă pe $B_2$.

În circuitele de comandă mai complicate se folosesc comutatoare poziționale (de exemplu poz. zero — întrerupe alimentarea tuturor circuitelor; poz. „mers" — conectează toate circuitele; poz. „probă" — conectează o parte din circuite și deconectează restul), care comportă o manetă de comandă și mai multe perechi de contacte din care unele normal închise, altele normal deschise.

2.9.3. **Relee.** Releul este un aparat care, sub acțiunea unui semnal exterior, trece automat din starea în care se găsea în altă stare bine definită, într-un interval de timp determinat.

Prin funcțiile ce le îndeplinesc și prin schemele constructive în care sînt introduse, releele sînt de o mare diversitate și ele pot fi grupate după diverse criterii, ca spre exemplu:

— După felul semnalului și mărimea acestuia:

● relee de curent maxim și relee de curent minim (poziția organului mobil se schimbă la o valoare de curent dată);

● relee de tensiune maximă, de tensiune minimă sau relee de tensiune nulă (organul mobil își schimbă poziția la o valoare de tensiune dată);

● relee termice (intră în acțiune cînd temperatura controlată a fost depășită);

● relee de turație maximă;

— După funcția îndeplinită:

● relee de protecție; relee de comandă; relee de semnalizare;

● relee intermediare (retransmite starea unui releu cu care este pus în dependență însă la parametri diferiți de releul primar);

● relee de timp (dau comandă de acționare după un timp dat, de la primirea semnalului).

— După principiul constructiv și funcțional: relee electromagnetice; relee electronice, relee termice; relee pneumatice.

Prezentarea cîtorva tipuri de relee folosite în mod curent în circuitele locomotivelor electrice:

*a) Releu de curent maxim* (fig. 2.79). Este de tip electromagnetic, avînd bobina parcursă de curentul circuitului ce îl controlează, sau o parte din acest curent proporțional cu valoarea reală.

Bobina releului de curent maxim ($B-RIM$) este alimentată de la transformatorul de curent ($TI$), dacă circuitul este de curent alternativ. Cînd valoarea curentului depășește pe aceea reglată, releul intră în acțiune, poziția armăturii mobile se schimbă și odată cu ea se schimbă și poziția contactelor $C_1$, $C_2$ (în schemă s-a presupus că releul are un contact direct $C_1$ — se închide la atragerea armăturii și un contact indirect $C_2$ — se deschide cînd armătura este atrasă) care modifică în mod corespunzător starea circuitelor de protecție în care se află (bobina $B-A$ a unui aparat oarecare va primi alimentarea; bobina $B-B$ își întrerupe alimentarea).

În figura 2.80 s-a reprezentat principiul constructiv al unui releu maximal de curent (releu electromagnetic) pentru protecția la suprasarcini a motorului de tracțiune de pe locomotiva de curent continuu.

Pe miezul de oțel *1*, este înfășurată bobina *2* în serie cu circuitul motorului de tracțiune. Un capăt al armăturii *3* este legat cu resortul *4*, celălalt cu tija *5* ce comandă contactul *6* înseriat în circuitul bobinei de reținere al întrerupătorului automat principal. Contactul se înseriază cu un alt contact din circuitul de alimentare al bobinei *h* (fig. 2.87), care îi taie alimentarea cînd contactul *6* se deschide.

Pentru un curent $I$ al motorului de tracțiune mai mare decît $I_{max}$ admis, armătura *3* (fig. 2.80) este atrasă, tija *5* comandă deschiderea contactului *6* și automatul principal al locomotivei declanșează. Curentul din circuitul motorului se întrerupe și armătura *3* revine în poziția deschis datorită resortului *4* și contactul *6* se reface, însă excitația bobinei de reținere a automatului principal nu se poate restabili fără ca mecanicul să intervină pentru reanclanșare, manual sau de la distanță.

Pentru a se cunoaște releul al cărui electromotor a acționat se montează un indicator *7*, legat cinematic de tija *5* de acționare. Un asemenea releu se montează pentru fiecare electromotor de tracțiune.

Asemenea relee sînt denumite și relee de semnalizare și au practicată o ferăstruică în corpul cutiei releului; cînd releul se află în poziția normală

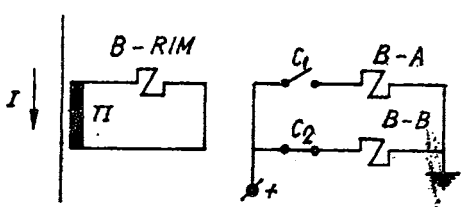



*Fig. 2.79.* Schema de montaj a unui releu de curent maxim.

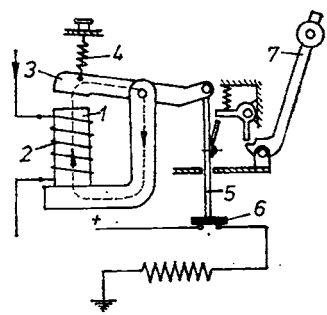



*Fig. 2.80.* Releu de sarcină (curent maxim) montat în circuit de curent continuu pentru protecția motorului de tracțiune.

plăcuța de avertizare (discul *7*) nu este vizibil, iar dacă a acționat, plăcuța avertizoare cade și apare vizibilă în dreptul ferăstruicii.

*b*) *Releu de tensiune minimă.* Din punct de vedere constructiv sînt asemănătoare celor de curent maxim (sînt tot de tip electromagnetic) numai că

bobina este cu spire multe și subțiri și se conectează la rețeaua a cărei tensiune se controlează. Conectarea bobinei se face la rețea direct, prin intermediul unui transformator de tensiune (dacă este vorba de circuit în curent

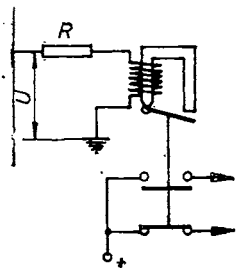



*Fig. 2.81.* Schema de montaj a unui releu de tensiune.

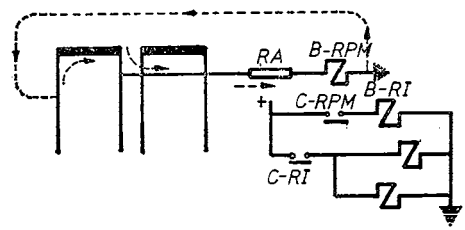



*Fig. 2.82.* Schema de montaj a unui releu de control al punerii la masă.

alternativ), sau cu o rezistență $R$ de limitare. Această ultimă soluție este exemplificată în figura 2.81.

*c) Releu de control al punerii la masă.* Cînd izolația unui circuit slăbește, are loc o scurgere de curent la masă. Un releu de punere la masă sesizează o atare scurgere (este un releu electromagnetic foarte sensibil), în care scop el se montează ca în schema din figura 2.82. La slăbirea izolației unui conductor sau aparat într-un punct oarecare, atunci se formează un circuit care se închide pe traseul figurat punctat, iar prin bobina releului de punere la masă ($B—RPM$) va trece un curent și releul acționează dînd comandă de închidere, prin contactul său ($C—RPM$), la un releu intermediar ($B—RI$, $C—RI$) care la rîndul său acționează asupra diferitelor circuite de protecție și semnalizare.

2.9.4. **Protecția la supratensiuni.** Supratensiunile ce pot apărea la locomotivă, și care pot provoca străpungerea izolației cea mai slabă întîlnită în cale, pot fi de origine atmosferică sau de comutație. Cele de origine atmosferică (de ordinul a sute de kV) provin de la trăsnete ce pot atinge direct linia de contact, sau o instalație vecină liniei de contact care o influențează prin inducție electrostatică și electromagnetică. Supratensiunea de comutație apare la manevrarea aparatajului de rupere (protecție); aceste supratensiuni sînt cu atît mai periculoase cu cît de descreșterea amplitudinii undei este mai lentă (la topirea unei siguranțe fuzibile din circuitul de forță 1,5 kV, poate apărea o supratensiune de ordinul a 10 kV).

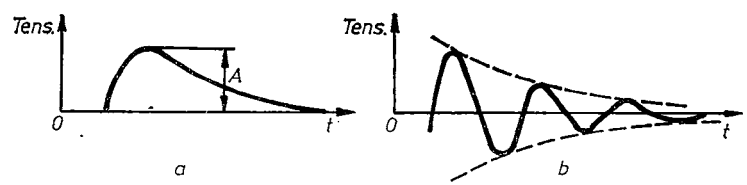



*Fig. 2.83.* Supratensiuni, forme de undă : *a* — aperiodică ; *b* — oscilantă.

Undele de supratensiuni au forme diverse, după originea lor (fig. 2.83), pot fi aperiodice (fig. 2.83, *a*) sau oscilatorii (fig. 2.83, *b*) iar nocivitatea se caracterizează prin amplitudinea maximă a undei și panta frontului de undă.

Un sistem de protecție mai complet și practicat la primele locomotive cuprinde echipamentul indicat în figura 2.84.

Cu timpul s-a renunțat la condensator ($C$) care este un element fragil. Pe locomotivele electrice de curent continuu sovietice (construcții mai vechi, însă de mare serie) protecția la supratensiuni este asigurată prin bobina de mare inductanță $B$ și descrescătorul $D$.

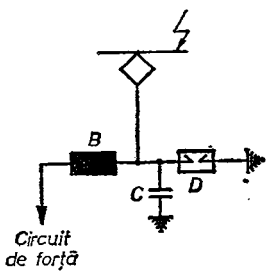



*Fig. 2.84.* Schema protecției la supratensiuni: $B$ — bobină de mare inductanță; $C$ — concensator; $D$ — descărcător.

Reactanța bobinei este $X = L.\omega = L.2\,\pi f$. Cum supratensiunile sînt unde de frecvență foarte mare, bobina lucrează ca un tampon, respingînd undele către descărcător și prin acesta la pămînt. În regim normal de exploatare, fiind vorba de curent continuu ($f = 0$), bobina nu opune curentului principal decît o rezistență infimă dată numai de rezistența ei ohmică.

Drept descărcător, se folosește fie descărcătorul simplu cu coarne, fie descărcătoarele electrolitice cu aluminiu sau descărcătoarele cu tirit.

Descărcătoarele electrolitice cu aluminiu dau rezultate foarte bune în exploatarea locomotivelor electrice. Un asemenea sistem de descărcător este reprezentat în figura 2.85 și constă dintr-un anumit număr de celule, care depinde de tensiunea maximă admisibilă.

Fiecare celulă este constituită dintr-un vas, în care se găsesc electrozi de aluminiu cufundați într-un electrolit bazic. În urma fenomenelor electrochimice ce au loc, electrozii se acoperă cu un strat de hidroxid de aluminiu, care creează o mare rezistență în calea curentului electric. Dacă tensiunea din linie depășește însă o anumită valoare critică, stratul de hidroxid de aluminiu este străpuns și el nu mai reprezintă decît o foarte mică rezistență, permițînd astfel scurgerea curentului la pămînt.

Tensiunea critică pe celulă este de ordinul a 300···400 V și se leagă în serie atîtea celule cîte reclamă tensiunea liniei de contact; la tensiunea de

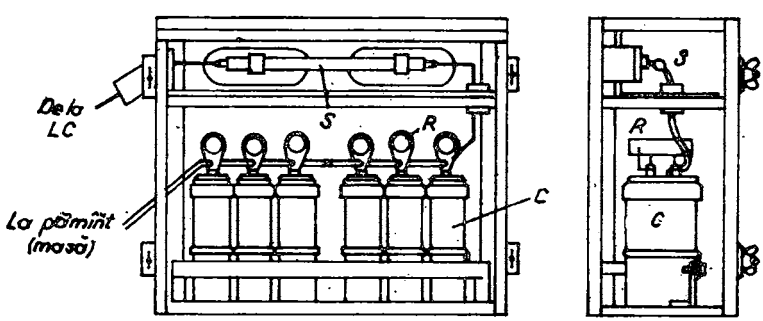



*Fig. 2.85.* Descărcător electrolitic cu aluminiu: $C$ — celulă; $S$ — siguranță; $R$ — rezistență șunt.

3 300 V în linia de contact se conectează 10···12 celule. Cînd tensiunea scade sub cea critică, elementul străpuns se reface singur.

Se pot de asemenea, întrebuința și parafulgere cu tirit. Aceste parafulgere sînt constituite în esență dintr-o serie de discuri din tirit, material care are

proprietatea de a-şi micşora brusc rezistenţa electrică atunci cînd tensiunea depăşeşte o anumită limită (rezistenţă neliniară).

În prezent s-a renunţat şi la bobina $B$ (aparat voluminos şi greu), a cărei eficacitate este discutabilă şi se foloseşte numai descărcător cu rezistenţă variabilă.

2.9.5. **Protecţia locomotivei la suprasarcini şi scurtcircuite.** La intrarea circuitului principal în locomotivă se instalează un întrerupător automat principal cu acţiune rapidă $IA$. El are rolul de a declanşa (întrerupe circuitul principal) în cazul supraintensităţilor de durată periculoase şi la scurtcircuite, înainte de a se ajunge la valoarea permanentă a curentului de scurtcircuit. Din această cauză, întrerupătorul rapid trebuie astfel construit, încît să prezinte o inerţie mecanică şi magnetică pe cît posibil mai reduse.

Diagrama de funcţionare a unui întrerupător rapid este indicată în figura 2.86.

Dacă nu ar interveni întreruperea rapidă a circuitului, curentul de scurtcircuit ar creşte după curba *1* şi ar atinge valoarea $i_{max}$, iar după întrerupere ar începe să descrească, după timpul $t'_2$. Întrerupătorul rapid intră în funcţiune după timpul $t_1$ (curba *2*) cînd curentul a atins valoarea $i_s$; mecanismul de întrerupere necesită timpul $t_2$ denumit „timp propriu", cînd contactele încep să se îndepărteze ($t_2$ este de ordinul 0,005 ··· 0,002 s). Timpul de stingere a arcului este $t_3$. Durata totală de la începutul scurtcircuitului şi pînă la terminarea stingerii arcului este $t_1 + t_2 + t_3$, denumit timp de declanşare a între-

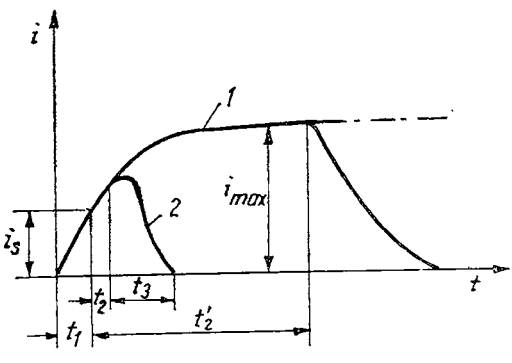



*Fig. 2.86.* Diagrama de funcţionare a unui întrerupător rapid.

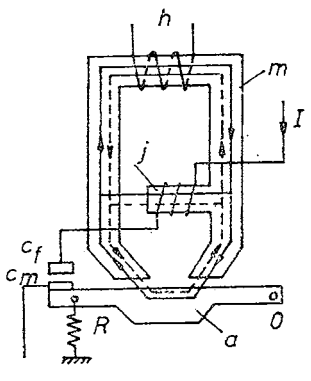



*Fig. 2.87.* Principiul constructiv al unui întrerupător rapid $m$—magnet în formă de potcoavă; $j$ — jug; $a$ — armătură; $c_f, c_m$—contact fix, contact mobil; $h$ — înfăşurare de excitaţie; $I$ — curentul total al locomotivei.

rupătorului automat rapid şi care este de ordinul 0,01 ··· 0,03 la locomotivele de curent continuu.

Principiul constructiv unui întrerupător rapid este redat în figura 2.87.

Pe magnet se află înfăşurarea bobinei $h$, alimentată de la o sursă de curent independentă de curentul principal. Bobina $h$ şi curentul care o străbate sînt

astfel dimensionate încît se produce o puternică forță de atracție asupra armăturii *a*. Circuitul magnetic conține și jugul *j*, care este separat printr-un întrefier de brațul magnetului. În jurul jugului se găsește înfășurat un bobinaj parcurs de curentul principal *I* al locomotivei. Acest bobinaj este astfel dispus, încît acțiunea sa asupra armăturii este diferențială față de aceea produsă de bobina *h*. Fluxul magnetic al bobinei *h* străbate întregul miez *m* și se închide prin armătură. Prin jug trece numai o mică parte din flux, deoarece reluctanța magnetică a jugului este foarte mare din cauza întrefierului. Fluxul produs de curentul principal din bobinajul *j* străbate jugul și întrefierul și se derivă în două părți. Cea mai importantă parte se închide pe drumul cel mai scurt, adică prin armătură, iar o mică parte prin miez, pe drumul cel mai lung. Atît timp cît nu s-a produs un scurtcircuit, forța de atracție exercitată de bobina *h* asupra armăturii este mai puternică decît forța datorită bobinei *j* și arcului antagonist *R*; din această cauză, armătura *a* rămîne atrasă, iar contactul închis. Dacă se produce însă o creștere rapidă a curentului principal — din cauza unui scurtcircuit — se slăbește imediat forța de atracție datorită bobinei *h*, iar arcul *R* care intră în partea constructivă a armăturii deschide contactul, întrerupînd circuitul principal.

Variația rapidă de flux are loc numai în circuitul magnetic de lungime mică constituit din jug și armătură. Acest circuit magnetic cuprinde o lungime redusă de fier, un întrefier de aer și nu străbate bobina *h*; datorită acestei cauze, inerția magnetică corespunzătoare este foarte redusă. Deoarece și inerția mecanică a dispozitivului de întrerupere este redusă la maximum, fenomenul de întrerupere are loc într-un interval de timp foarte scurt (automatul este deci sensibil la $di/dt$).

Schema constructivă a întrerupătorului rapid este prezentată în figura 2.88

Închiderea întrerupătorului are loc în modul următor: se trimite aer comprimat în cilindrul *C*. Pistonul din cilindru împinge, prin pîrghia $p_3$, pîrghia $p_2$; aceasta la rîndul ei împinge pîrghia $p_1$ pînă la o distanță la care se produce atragerea acesteia de către magnetul *m* și menținerea în poziție lipită.

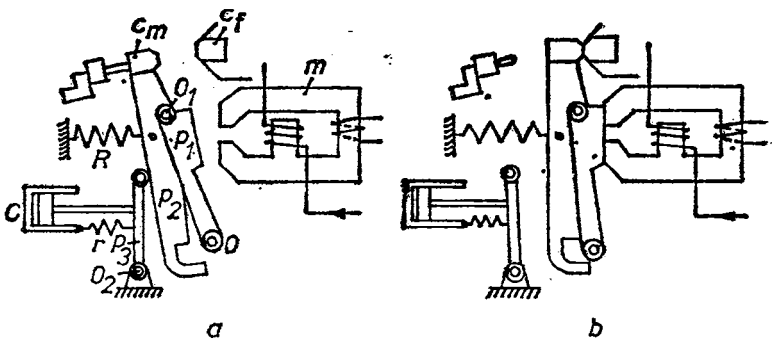



*Fig. 2.88.* Schema constructivă a unui întrerupător rapid : *a* — poziția deschis ; *b* — poziția închis ; $p_1$, $p_2$, $p_3$ —pîrghii de acționare ; $o_1$, $o_2$, $o_3$ — articulații ; *R*, *r* — arcuri ; *c* — cilindru pneumatic.

Totodată se efectuează și închiderea contactului $c_m$—$c_f$, cu care ocazie este tensionat arcul *R* care de altminteri, determină și presiunea de contact.

Deschiderea întrerupătorului are loc sub acțiunea arcului *R*, cînd curentul *I* depășește limita maximă admisă.

2.9.6. **Protecția diferențială contra punerilor accidentale la masă.** O punere la masă nu echivalează totdeauna cu un scurtcircuit net. Cînd în circuit se află o rezistență de valoare importantă înaintea punctului unde a luat naștere un arc (punctul de defect) acesta poate limita curentul de defect la o valoare inferioară celei de reglaj a releului de suprasarcină care supraveghează circuitul respectiv. De aceea, se recurge la o protecție diferențială de curent (fig. 2.89), bazată nu pe valoarea absolută a curentului, ci pe diferența de curent la intrarea ($I$) și ieșirea curentului din circuit ($I'$), folosind un releu diferențial de curent ($RDI$ — vezi și fig. 2.3), care dă comandă de acționare întrerupătorului principal al locomotivei.

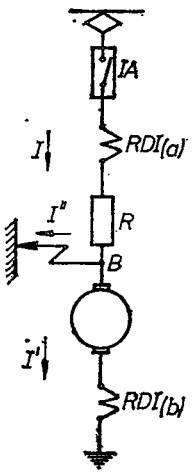



*Fig. 2.89.* Schema protecției diferențiale de curent, pentru puneri accidentale la masă.

2.9.7. **Protecția la tensiune minimă.** La o scădere a tensiunii în linia de contact sub valoarea minimă prescrisă de norme, sau la dispariția ei, tensiunea contraelectromotoare a motoarelor tinde rapid spre zero. Dacă locomotiva se află pe o treaptă de mers cu reostatul eliminat din circuit și tensiunea se restabilește apare riscul de supraintensități și cerc de foc la colector.

Pentru preîntîmpinarea acestor situații se prevede protecția cu un releu de tensiune minimă ($RT_m$ — fig. 2.3), care dă comandă de declanșare la întrerupătorul automat principal.

În exploatare însă, pantograful se desprinde și se reprinde frecvent pe firul de contact și ar însemna ca releul de tensiune să lucreze tot așa de frecvent, lucru care nu se întîmplă întrucît fluxul din motoarele de tracțiune nu dispare instantaneu (odată cu desprinderea pantografului), ci fluxul rezidual întreține o tensiune suficientă pentru menținerea atrasă a armăturii releului.

2.9.8. **Contactoare.** Contactorul este un aparat de comutație instalat într-un circuit de forță și avînd rolul de a stabili sau întrerupe acest circuit la comandă. Elementele constructive ale unui contactor sînt reprezentate schematic în figura 2.90.

Contactele mobil și fix se execută ca piese detașabile, ele fiind elemente ce se uzează să poată fi înlocuite și în mod obișnuit se folosește cupru a cărui secțiune este în funcție de valoarea curentului din circuitul respectiv.

La suprafața contactelor se formează oxid de cupru, iar din cauza arcului electric ce apare la ruperea circuitului se produc perlări (bobițe mici de metal) pe contacte, pentru înlăturarea cărora pîrghia contactului mobil se face din brațe articulate și între ele se include un arc elicoidal ($R$). Datorită acestei construcții închiderea are loc într-un punct mai spre

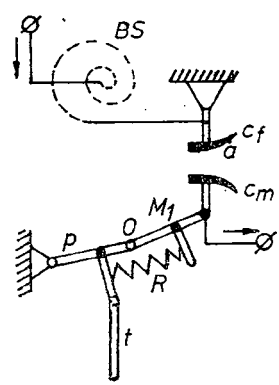



*Fig. 2.90.* Schema constructivă a unui contactor: $c_f$,$c_m$ — contact fix, respectiv mobil; $p$ — pîrghia de acționare a contactului mobil; $t$ — tija de acționare a contactorului; $BS$ — bobină pentru suflaj electromagnetic.

vîrf (*a*), iar terminarea închiderii se face printr-o frecare între cele două suprafețe pe porțiunea lor plană (în felul acesta se înlătură oxidul de cupru). La deschiderea contactului are loc alunecarea inversă a contactului și ruperea lui se face tot în preajma punctului (*a*), loc unde poate apărea perlarea (deci nu pe contactul propriu-zis de serviciu).

Contactoarele sînt de o mare diversitate, după criteriul avut în vedere la clasificare (tensiunea, curentului, numărul de poli, dispozitivul de acționare · · ·).

După dispozitivul de acționare, contactoarele se împart în:

— contactoare mecanice, la care contactul mobil este acționat de o camă care prin rotație mișcă o rolă situată pe tija contactorului și asigură închiderea și deschiderea. De regulă asemenea contactoare se folosesc pentru acționările de grup unde mai multe contactoare sînt acționate de același arbore cu came care se rotește pas cu pas, fiecare pas corespunzînd unei trepte de mers; acționarea arborelui cu came se face de un servomotor pneumatic sau electric;

— contactoare electromagnetice;

— contactoare electropneumatice.

Pe locomotive se utilizează de regulă contactoare electromagnetice și electropneumatice.

2.9.8.1. *Contactorul electromagnetic.* Mecanismul de acționare a contactului mobil $c_m$ (figura 2.91) este alcătuit din electromagnetul *1*, care îl acționează prin intermediul pîrghiilor articulate *2*. Bobina *b* se calculează pentru a funcționa sub tensiunea circuitului de comandă, de obicei 48 · · ·110 V și la curent 1 · · ·1,5 A.

Contactoarele electromagnetice se utilizează în circuite de forță, avînd curenți de lucru de ordinul a 100 A.

2.9.8.2. *Contactorul electropneumatic.* Asemenea contactoare se montează în circuite de intensități mari, pentru care motiv trebuie asigurată o presiune suficientă pe suprafețele de atingere ale contactoarelor. Acționarea contactului trebuie să se facă destul de repede în scopul de a nu da posibilitatea să se formeze un arc voltaic pentru un timp mai îndelungat. Din aceste motive sînt necesare construcții și mecanisme specifice de acționare. De asemenea, se prevăd bobine pentru stingerea arcului voltaic.

Contactul mobil primește mișcarea de la un cilindru cu aer comprimat comandat de către o supapă electropneumatică.

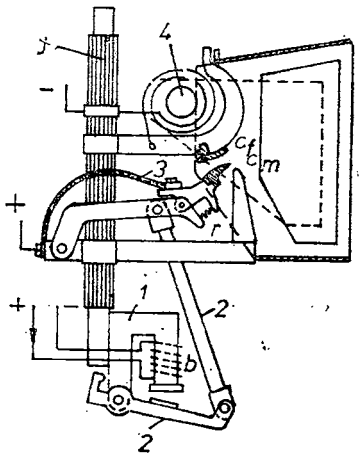
Principiul unei supape electropneumatice este indicat în figura 2.92. Admisia și evacuarea aerului în cilindrul *8* sînt comandate de supapa *3*; la trecerea curentului de comandă prin bobina electromagnetului *1*, tija *2* deschide supapa *3* (o apasă) și aerul comprimat de la conducta de aer comprimat *7* intră în cilindrul *8*. În același timp tija 4 închide orificiul *5* care servește pentru evacuarea aerului.

La întreruperea curentului de comandă, arcul *9*, lucrînd în același sens cu forța de presiune a aerului comprimat, închide supapa, tija *4* deschide orificiul *5* permițînd evacuarea aerului din cilindrul *8* în atmosferă, pistonul din cilindrul *8* coboară sub acțiunea exercitată de arcul *6* și contactorul prin pîrghiile de acționare întrerupe circuitul.

Diametrul cilindrului de aer este în jur de 15 mm, iar la o presiune de 5 kg/cm$^2$ se exercită între contacte o presiune de 30 · · ·35 kg. Consumul de

aer pentru deservirea contactorului este cu totul neglijabil față de consumul pentru frînă.

Contactoarele electropneumatice au căpătat pe locomotivele electrice cea mai mare răspîndire.




*Dig. 2.91.* Contactor electromagnetic, schemă constructivă; $c_m$, $c_f$ — contact mobil, respectiv fix; *1* — electromagnet de acționare; *2* — tiji de acționare; *3* — legătură electrică; *4* — bobina de suflaj magnetic a arcului voltaic; *t* — tijă izolantă.

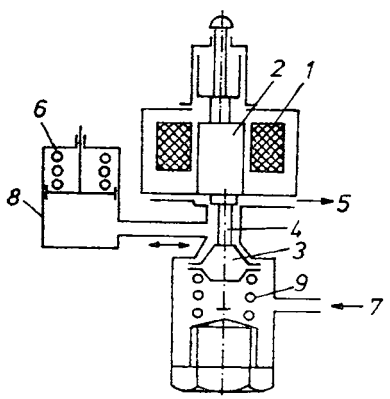



*Fig. 2.92.* Schema constructivă a unei supape electropneumatice: *1* — bobina; *2* — miezul electromagnetului; *3* — capul supapei; *4* — tija supapei; *5* — orificiu de evacuare a aerului; *6, 9* — arcuri elicoidale; *7* — conducta de aer comprimat; *8* — cilindru de aer comprimat.

**2.9.9. Inversorul de mers.** Este un aparat montat în circuitul de forță și prin care se asigură inversarea sensului de rotație a motorului de tracțiune și implicit sensul de circulație al vehiculului motor. Inversarea sensului de rotație a motorului se obține fie prin inversarea sensului curentului în inductor, fie prin inversarea sensului curentului în indus.

Cînd schema circuitului de forță permite, inductorul motorului se situează spre masă din motive de izolare și ca atare și inversorul se amplasează tot spre masă, iar schimbarea sensului curentului se face în inductor.

Manevrarea inversorului se face totdeauna cu vehiculul staționînd, adică fără curent. În acest mod se simplifică și construcția aparatului, nemaifiind necesar a prevedea dispozitive de stingere a arcului voltaic. Pentru evitarea comenzilor greșite, se prevăd înzăvorîri ale inversorului față de motor (dependență față de contactorul de linie al motorului) și față de aparatul de comandă

(controler sau manipulator) în sensul că manevra inversorului nu se poate face decît cu aparatul de comandă adus pe poziția zero.

Din punct de vedere constructiv, inversorul de mers este realizat ca un controler, adică un tambur din material izolant pe care sînt fixate segmente de cupru ($a$, $b$, $\cdots$) care prin rotirea tamburului vin în contact cu o serie de degete de contact ($D_1$, $D_2 \cdots$) fixate pe un suport la carcasa inversorului și la care sînt conectate capetele înfășurărilor motorului de tracțiune.

O schemă de conexiuni simplificată pentru un motor din care rezultă modul de lucru a inversorului este redată în figura 2.93.

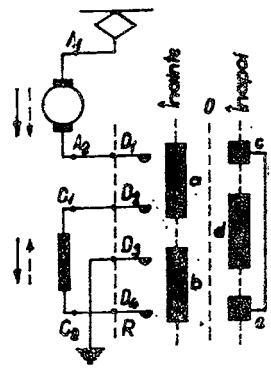



*Fig. 2.93.* Scheme de conexiuni pentru inversarea sensului de mers.

Cînd se manevrează tamburul inversorului pe poziția „înainte", segmentele $a$ și $b$ pun în contact degetele $D_1 - D_2$, respectiv $D_3 - D_4$, iar circuitul curentului prin motor va fi $A_1 - A_2 - C_1 - C_2 - D_4 - D_3 - O$ (după săgeata plină). La manevrarea tamburului inversorului pe poziția „înapoi", segmenții de contact $c - e$ pun în contact degetele $D_1 - D_4$, respectiv $d$ pe $D_2 - D_3$, cînd circuitul prin motor va fi $A_1 - A_2(D_1) - D_4(C_2) - C_1(D_2) - D_3 - O$ (după săgeata figurată punctat). Se observă din schemă că la manevra tamburului inversorului, sensul curentului în motor s-a schimbat numai în înfășurarea de excitație ($C_1 - C_2$).

În cazul cînd locomotiva dispune de mai multe motoare (sau grupe de motoare) legate în paralel, schema din figura 2.93 se repetă pentru fiecare motor.

Comanda inversorului (rotirea tamburului) se poate face *direct* din controler (inversorul este inclus constructiv în controlerul de comandă) prin manevrarea manetei inversorului pe poziția „înainte" sau „înapoi", sau *indirect* cînd în controler (sau manipulator) se prevăd numai contactele de comandă la distanță ale dispozitivului de acționare a inversorului care de regulă este un servomotor pneumatic.

În figura 2.94 s-a reprezentat schematic mecanismul electropneumatic de acționare a tamburului inversorului care, în principiu constă dintr-un

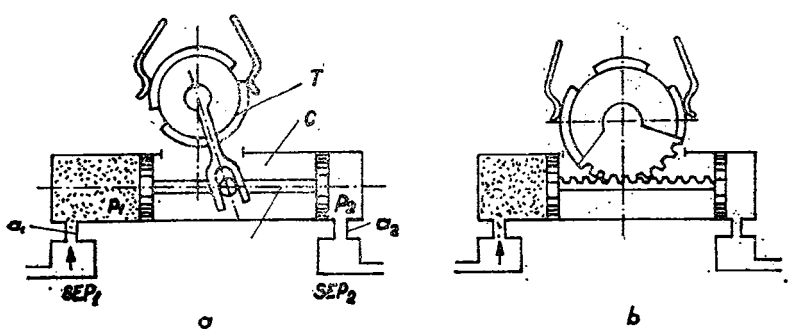



*Fig. 2.94.* Mecanism electropneumatic pentru acționarea inversorului de mers.

cilindru cu aer comprimat ($C$) avînd un piston cu două fețe ($p_1$, $p_2$) și două supape electropneumatice ($SEP_1$, $SEP_2$).

La comanda inversorului pe poziția „înainte" primește alimentare bobina supapei $SEP_1$ care acționînd dă drumul aerului comprimat prin canalul $a_1$ și pistonul se deplasează de la stînga la dreapta. Mișcarea de translație a pistonului se transformă în mișcare de rotație a tamburului inversorului ($T$) fie prin dispozitiv bielă-manivelă (fig. 2.94, *a*), fie prin dispozitiv cremalieră-segment dințat (fig. 2.94, *b*).

La comanda inversorului pe poziția „înapoi", acționează $SEP_2$ ($SEP_1$ i se taie alimentarea și pune cilindrul $p_1$ în legătură cu atmosfera) și lucrurile se petrec ca mai sus însă acționarea se produce în sens invers.

Pentru cazuri mai simple (mai puține motoare), inversorul poate fi înlocuit cu o schemă cu contactoare acționate în grup de un arbore cu came, ca în figura 2.95.

La mersul „înainte" acționează contactoarele $K_1$, $K_2$ iar la mersul „înapoi" lucrează contactoarele $K_3$, $K_4$ ($K_1$, $K_2$-deschise).

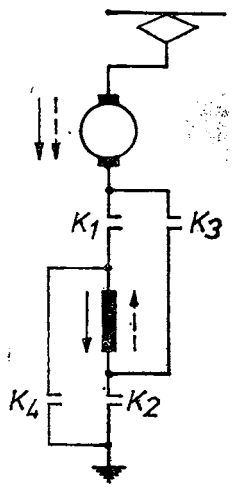



*Fig. 2.95.* Schemă de inversare a sensului de mers, cu contactoare.

## 2.10. CIRCUITE DE COMANDĂ

Cu excepția aparatajului de izolare (separatoarelor de pe acoperiș, separatoarele de izolare a motoarelor ···) tot aparatajul circuitului de forță (v. fig. 2.3) și a circuitelor serviciilor auxiliare (v. fig. 2.56) sînt comandate de mecanic din cabinele de conducere prin butoane, comutatoare și aparatul de comandă legate prin fascicole de cabluri de aparatajul de execuție, constituind circuitele de comandă ale locomotivei.

Ca aparataj de execuție, așa cum s-a arătat la § 9, se folosesc în principal contactoarele (individuale sau cu acționare de grup), servomotoare de acționare, inversoare de mers ···

Ca aparat central de comandă se folosește controlerul cu acțiune directă (controler cu segmenți sau controler cu came), soluție mai veche și care se mai practică la vehicule cu tensiune redusă (tramvai, troleibuz ···), sau în prezent se folosește sistemul de comandă indirect folosind ca aparat central fie un controler cu acțiune indirectă (operează de la distanță în circuitele de comandă ale bobinelor contactoarelor sau comandă acționarea servomotoarelor...), fie un manipulator cu impulsuri avînd ca organ de manipulare o manetă sau un volan.

În figura 2.96 sînt arătate, pentru exemplificare, pozițiile ce le poate ocupa volanul unui astfel de manipulator și la ce corespund ele (este manipulatorul unei locomotive de curent continuu de construcție recentă).

O prezentare schematică a circuitului de comandă este redată în figura 2.97. Aparatajul se repartizează în diverse blocuri de aparate racordate prin

fișe ce aparțin cablajelor multiconductor la reglete de borne, iar de aici tot prin cablaj multiconductor se face legătura la pupitrele de comandă, care se conectează tot prin fișe.

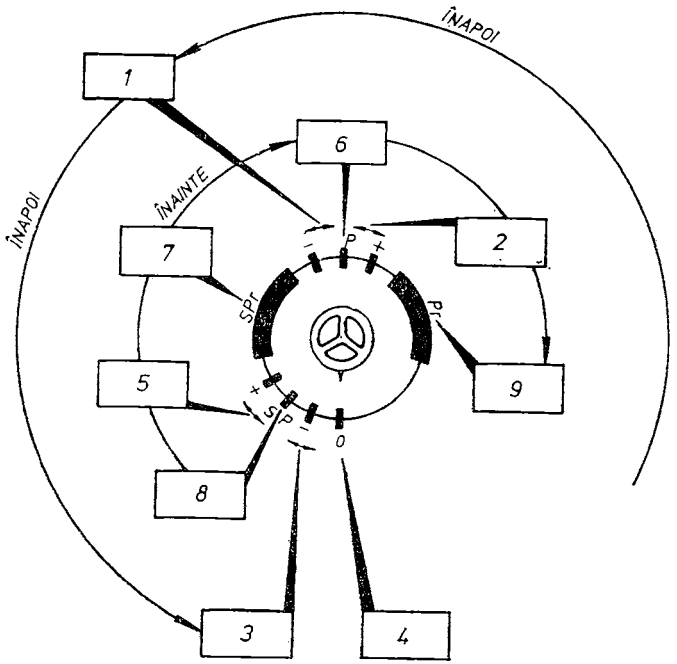



*Fig. 2.96.* Manipulator de impulsuri: *O*, *SP*, *SPr*, *P*, *Pr*—pozițiile manipulatorului corespunzătoare diverselor interconectări ale motoarelor; *1* — la fiecare impuls din *P* la (—) urmată de revenire în *P*, servomotorul regresează o treaptă; *2* — la fiecare impuls din *P* la (+) urmat de revenire în *P* servomotorul avansează o treaptă pe conexiunea paralel; *3*, *4*, *5*, *6*, *7*, *8*, *9* — pozițiile manipulatorului la care se avansează cîte o treaptă pe diversele interconectări ale motoarelor ($s-p$, $p$), sau regresează cîte o treaptă, sau revenire la treapta *O*; avansarea sau regresarea se întrerup cînd se aduce manipulatorul în poziția *P* sau *SPr*.

## 2.11. FRÎNAREA ELECTRICĂ

2.11.1. **Generalități.** Locomotivele electrice pot fi înzestrate cu frînă electrică, a cărei realizare se bazează pe principiul reversibilității funcționale a electromotorului de tracțiune.

În regim de tracțiune, motorul de tracțiune primește energie electrică de la linia de contact pe care o transformă în energie mecanică disponibilă la arbore și de aci la obada roților motoare servind la tracțiunea trenului.

În regim de frînă electrică, motorul de tracțiune devine generator a cărui putere mecanică la arbore este furnizată de energia cinetică $\left(E_c = \frac{1}{2}\, mv^2\right)$ acumulată de tren la mersul în palier și aliniament sau energia potențială ($E_p = Q \cdot h$) acumulată de tren la circulația în rampă.

În regim de generator, cu o excitație convenabilă, energia electrică poate fi consumată pe o rezistență (reostat), în care caz se realizează frîna electrică reostatică, sau poate fi livrată liniei de contact, în care situație frîna se numește recuperativă.

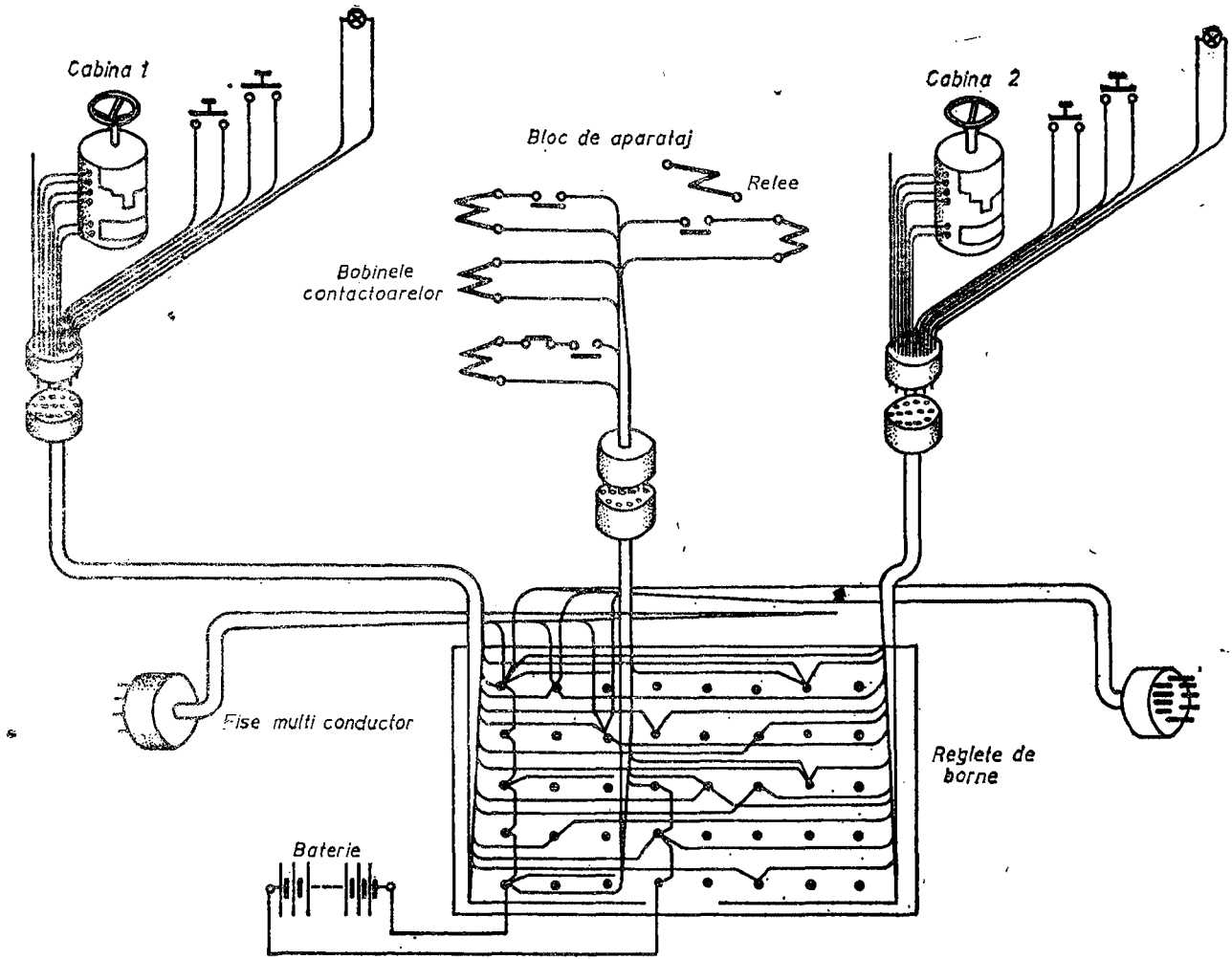



*Fig. 2.97.* Dispoziția generală a circuitelor de comandă ale unei locomotive.

Ecuațiile de bază pentru trecerea de la regim de tracțiune la regim de frînare sînt următoarele:

| Regim tracțiune | Regim frînare |
|---|---|
| — puterea electrică absorbită devine putere mecanică la obadă<br>$0{,}367\, UI\eta = F_0 V$ | — puterea de la obadă se transformă în putere electrică la bornele generatorului<br>$F_0 V = 0{,}376\, UI \frac{1}{\eta'}$, |
| — mersul în palier<br>$F_m - F_r = M \cdot a$ | — mersul în palier<br>$F_f + F_r = M \cdot a'$ |
| — mersul în rampă<br>$F_m - F_r - F_i = M \cdot a$ | — mersul pe pantă<br>$F_f + F_r - F_i = M \cdot a'$ |
| — mersul în regim de echilibru pe rampă<br>$F_m = F_i + F_r$ | — mersul în regim de echilibru pe pantă<br>$F_f = F_i - F_r$ |

În relațiile de mai sus s-a notat:

$F_0$ — forța de tracțiune la obadă, în kgf;

$F_m$ — forța motoare a locomotivei, în kgf;

$F_r$ — forța rezistentă a trenului, în kgf;

$V$ — viteza de deplasare a trenului;

$U$, $I$ — tensiunea și curentul la motor (respectiv generator), în V, respectiv A;

$\eta$, $\eta'$ — randament global în regim de motor, respectiv regim generator;

$\pm F_i$ — forța datorită rampei, respectiv pantei, în kgf;

$M$ — masa trenului, în kg $s^2/m$;

$a$, $a'$ — accelerația, respectiv decelerația, în $m/s^2$.

Frîna electrică prezintă o serie de avantaje, dintre care mai importante sînt:

— sporește siguranța circulației, în sensul că ea constituie o frînă în plus, alături de frînele curente mecanice cu aer comprimat și de mînă;

— prin utilizarea frînei electrice se diminuează uzura saboților și bandajelor care reprezintă o problemă destul de dificilă în exploatare;

— se înlătură producerea prafului metalic care rezultă din frecarea saboților pe bandaje și care este extrem de dăunător pentru echipamentul electric;

— frîna electrică este independentă de starea atmosferică;

— în cazul frînei recuperative, economia de energie electrică ce se realizează conduce la o diminuare a cheltuielilor de exploatare.

Frînarea electrică are o serie de dezavantaje, printre care se menționează:

— este dificilă la viteze mici, întrucît forța electromotoare a generatorului, $E = K\Phi v$, este mică la viteze mici ($v$) și evident curentul de frînare este redus; din această cauză frînarea electrică se utilizează ca frînă de menținere și reglare a vitezei pe pante și nu ca frînă de oprire;

— necesită echipament suplimentar ceea ce conduce la unele complicații constructive;

— mașinile electrice de tracțiune se încălzesc în continuare și atunci cînd funcționează în regim de generator (regim de frînare).

Asupra tonajului trenului în regim de frînă electrică de menținere, se face precizarea că o locomotivă de greutate $G_L$, care circulă cu viteza $V$ pe o rampă $+i^0/_{00}$ și motoarele funcționînd la regim nominal remorcă tonajul $G_v$; aceeași locomotivă pe panta $-i^0/_{00}$ cu aceeași viteză $V$ și mașinile funcționînd tot la regim nominal, va reține un tonaj $G'_v$ (greutatea vagoanelor) astfel că $G'_v > G_v$. Acest lucru se datorește următoarelor cauze:

— în bilanțul puterilor, randamentul global în regim de tracțiune înmulțește, iar în regim de frînă împarte;

— tensiunea la bornele mașinii în regim de generator ($U'$) este mai mare decît în regim motor ($U$); în mod practic $U' \simeq 1{,}2\ U$.

Tonajul reținut pe pantă ($G'_v$) se determină scriind relația la mersul în regim de echilibru, adică:

$$[i(G_L + G'_v) - r_L G_L - r_v G'_v]\ \eta' = 1{,}2\ [i\,G_L + G_v) + r_L G_L + r_v G_v]\ \frac{1}{\eta},$$

$r_L$, $r_v$ sînt rezistențele specifice la rulare ale locomotivei, respectiv ale vagoanelor, corespunzătoare la viteza $V$.

Această posibilitate se folosește pentru anumite trenuri cu regim închis (suveică) pe linii cu rampă continuă, unde în rampă trenul circulă gol (tonajul $Q$), iar în pantă trenul circulă plin (tonaj $G'_v > G_v$). Tot datorită acestei proprietăți, în anumite scheme de frînare electrică nu se folosesc ca generatoare toate motoarele. ci numai o parte din ele.

2.11.2. **Frînarea electrică reostatică folosind generatorul serie.** Trecerea de la regim motor la regim generator ce debitează pe un reostat se poate face fie menținînd sistemul de excitație serie și la generator (generator serie), fie schimbînd sistemul de excitație la generator (de regulă generator cu excitație separată).

La trecerea din regim motor serie (regim de tracțiune) la regim generator serie (regim de frînare) trebuie să fie împlinite următoarele condiții (fig. 2.98):

— se deconectează întrerupătorul principal, pentru a întrerupe legătura cu linia de contact;

— sensul de rotație al indusului ($n$) se menține, evident, același în ambele regimuri;

— sensul curentului în înfășurarea de excitație se menține același și în regim generator pentru a nu se distruge magnetismul remanent, întrucît numai datorită acestuia se poate prinde generatorul (autoexcită);

— sensul curentului în indus, evident, se inversează;

— în regim de generator cuplul electromagnetic va fi $C = K\,\Phi\,(-I)$, adică își schimbă sensul față de regimul motor, interpretare care dă imaginea fizică a fenomenului frînării electrice;

— generatorul debitează pe rezistența de frînare ($R_f$).

*a) Stabilitatea electrică a generatorului serie, funcționînd în regim de frînă reostatică.* În momentul cînd se deconectează motorul de la rețea ($I = 0$) și trece în regim de generator datorită magnetismului remanent acesta va avea

o f.e.m. mică ($E_0$), iar curentul de frînare ($I_f$) va crește de la $I_f = 0$ la $I_f$ stabilizat cînd generatorul debitează pe rezistența de frînare $R_f$. Acest proces caracterizează regimul tranzitoriu a cărui durată fiind foarte mică viteza locomotivei în procesul tranzitoriu se aproximează constantă.

În procesul tranzitoriu, ecuația tensiunii generatorului va fi:

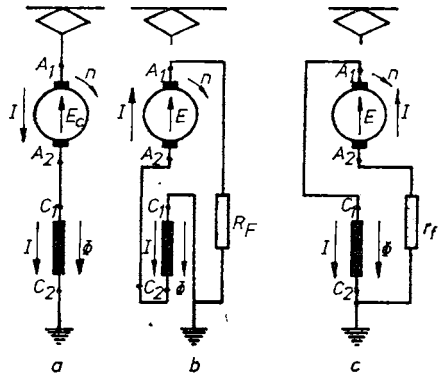



*Fig. 2.98.* Schema electrică de trecere de la regim de tracțiune cu motor serie, la regim de frînă reostatică folosind generator serie.

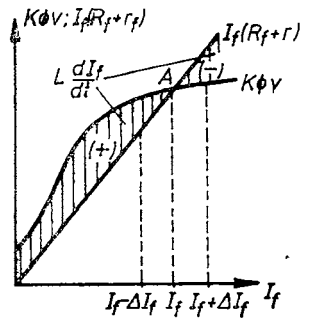



*Fig. 2.99.* Stabilitatea electrică a generatorului serie funcționînd în frînă reostatică.

$$E = K\Phi v = (R_f + r)\, I_f + L\frac{dI_f}{dt}, \qquad (1)$$

unde $L$ este inductanța circuitului electric de frînare; $L\dfrac{dI_f}{dt}$ este f.e.m. autoindusă în circuit datorită variației curentului $I_f = 0$ la $I_f$ stabilizat în perioada procesului tranzitoriu.

Ecuația procesului tranzitoriu (1) devine

$$L \cdot \frac{dI_f}{dt} = Kv\Phi - (R_f + r)I_f,$$

a cărei reprezentare grafică este redată în figura 2.99.

Curba $K\Phi v$ pentru $V = \text{const.}$ este tocmai curba de magnetizare $K\Phi(V)$; $(R_f+r)\, I_f$ este o dreaptă; suprafața hașurată reprezintă deci $L\dfrac{dI_f}{dt}$, iar semnul suprafeței este semnul derivatei $dI_f/dt$.

Punctul $A$ reprezintă regimul stabil de funcționare întrucît $E = K\Phi V = (R_f + r)\, I_f$; curentul s-a stabilizat $I_f = \text{const.}$ și deci $\dfrac{dI_f}{dt} = 0$.

Dacă, dintr-un motiv oarecare, curentul de frînare deviază la $I_f + \Delta I_f$ în circuit apare automat reacția negativă $L\dfrac{dI_f}{dt} < 0$ care readuce (scade)

pe $I_f$ în punctul $A$; la o deviere $I_f - \Delta I_f$ procesul se întîmplă invers, reacția $L\frac{dI_d}{dt} > 0$ și curentul este readus automat (crește) de asemenea tot în punctul $A$.

Din cele de mai sus rezultă că stabilitatea electrică a generatorului serie în funcționarea sa în regim de frînă reostatică este asigurată.

*b) Stabilitatea mecanică a generatorului serie, funcționînd în regim de frînă reostatică.* O frînă de vehicul se consideră că prezintă stabilitate mecanică atunci cînd, la o creștere a vitezei, crește și forța de frînare pentru a putea limita creșterea vitezei și invers la o scădere a vitezei trebuie să scadă și forța de frînare pentru a limita tendința de scădere a vitezei (altminteri trenul tinde să se oprească, dacă este vorba de o frînă de menținere pe pantă).

În cazul generatorului serie, la creșterea vitezei va crește și f.e.m. ($E = K\Phi V$) și implicit curentul debitat ($I_f$) care la rîndul său va spori cuplul de frînare ($C_f = K\Phi I_f$); la o scădere a vitezei lucrurile se petrec invers din punct de vedere funcțional. Ca atare generatorul serie prezintă și stabilitate mecanică cînd funcționează în regim de frînă reostatică.

*c) Scheme de frînare reostatică.* În mod curent ca reostat de frînare se folosește reostatul de pornire completat cu secții suplimentare de rezistență, pe care debitează generatoarele ce pot fi legate fie în serie (fig. 2.100), fie în paralel (fig. 2.101), fie individual (fiecare generator pe cîte o rezistență de frînare).

La amorsarea frînării cînd locomotiva circulă cu viteza maximă și generatorul debitează f.e.m. $E_{max}$, necesitatea limitării curentului de frînare $I_F$ con-

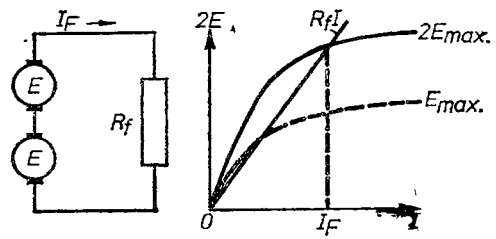



*Fig. 2.100.* Conectarea în serie a generatoarelor tip serie, funcționînd în frînă reostatică.

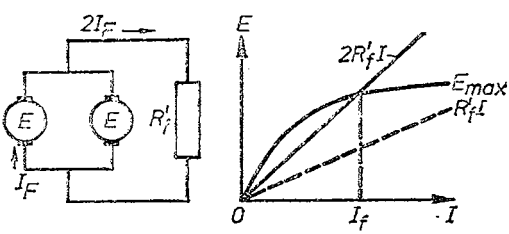



*Fig. 2.101.* Conectarea în paralel a generatoarelor tip serie funcționînd în frînă reostatică.

duce la mărirea lui $R_f$ la valori inadmisibile în cazul conectării generatoarelor în serie (fig. 2.100). Într-adevăr:

— pentru conectarea în serie, puterea de frînare $P = R_f I_f^2$;

— pentru conectarea în paralel, puterea de frînare $P' = R'_f(2I_F)^2$ și cum mașinile fiind aceleași,

$R_f I_f^2 = 4\, R'_f\, I_F^2$, ceea ce conduce la $R_f = 4\, R'_f$ pentru același curent de frînare debitat de generator.

La conectarea în paralel a generatoarelor trebuie însă luate măsuri speciale din cauza instabilității electrice ce poate apărea în funcționare. Considerînd două generatoare conectate ca în schema din figura 2.102 și admițînd mici diferențe între caracteristicile celor două generatoare, ca spre exemplu diferența între rezistențele interne, diferențe constructive ale motoarelor sau diferențe de turații datorite inegalității diametrelor roților motoare, lucru curent în practică, va rezulta că forțele electromotoare $E_1$ și $E_2$ nu sînt riguros egale, ceea ce creează în circuitul celor două mașini un curent de circulație $i$.

Aplicînd *legea lui Kirchoff* la circuitul din figura 2.102, rezultă:

$$E_1 - E_2 = 2ri;\ I_1 = \frac{1}{2} + i;\ I_2 = \frac{I}{2} - i.$$

Curentul $i$ amplifică repede valoarea lui $E_1$ și micșorează pe $E_2$ pînă cînd $i \simeq \frac{I}{2}$, situație în care generatorul $G_2$ își schimbă polaritatea, iar cele două generatoare funcționează în scurtcircuit și, nemaiapărînd un curent $I$ care să treacă prin reostatul de frînare $R_f$ frînarea reostatică nu funcționează. Pentru înlăturarea acestei dificultăți se încrucișează excitațiile celor două generatoare, ca în figura 2.103.

Orice mărire a curentului $I_1$ debitat de $G_1$ are ca efect creșterea tensiunii la bornele lui $G_2$, întrucît $I_1$ este curentul care trece în înfășurarea de excitație a lui $G_2$ și invers; inegalitățile de curent sînt corectate automat.

În practică se folosesc soluțiile menționate mai sus combinate (legarea a cîte două generatoare în serie și gruparea în paralel a două sau trei ramuri,

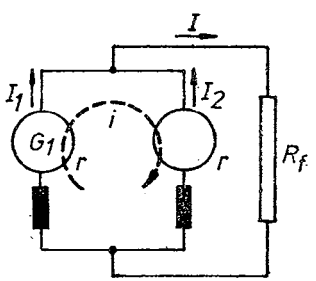



*Fig. 2.102.* Schema conectării în paralel a două generatoare serie, debitînd pe un reostat de frînare.

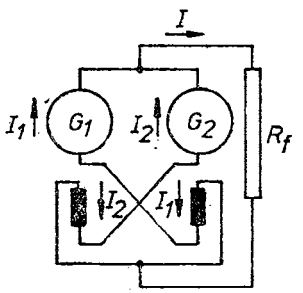



*Fig. 2.103.* Schema conectării în paralel a două generatoare serie, cu încrucișarea excitațiilor, debitînd pe un reostat de frînare.

legarea a cîte două generatoare în paralel și înserierea a două sau trei asemenea grupări, după numărul mașinilor; nu se folosește soluția cu debitarea fiecărui generator pe un reostat separat din cauza complicației acestora la reglarea frînării).

În figura 2.104 se prezintă schema frînei reostatice la o locomotivă Bo-Bo (două grupuri în serie de cîte două motoare legate în paralel în fiecare grupă), iar în figura 2.105 schema frînei reostatice la o locomotivă Co-Co.

Schema din figura 2.105 este denumită și „ciclică-dublă", unde indușii a două generatoare sînt legați în serie în grupe de cîte doi, fiecare grupă conectîndu-se în serie cu cîte o excitație din celelalte două grupe; în acest mod se realizează încrucișarea excitațiilor, cîte una din fiecare grupă (soluția este aplicată curent pe locomotivele de mare serie *VL*-19 din URSS).

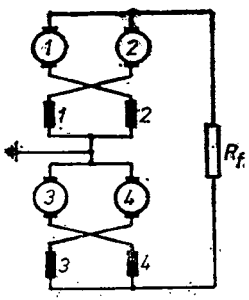



*Fig. 2.104.* Schema frînei reostatice cu generatoare serie, la o locomotivă electrică tip Bo — Bo.

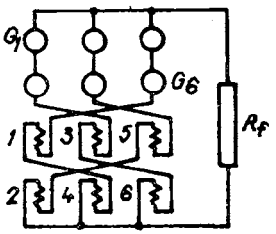



*Fig. 2.105.* Schema frînei reostatice cu generatoare serie, schemă ciclică dublă, la o locomotivă electrică tip Co — Co.

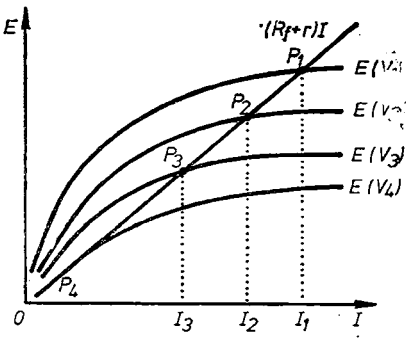



*Fig. 2.106.* Caracteristicile $E(I)$ și dreapta de sarcină $(R_f + r)I$ ale unei mașini serie.

*d) Caracteristica de frînare.* Este curba forței de frînare $(F_f)$, în funcție de viteză $(V)$, care se calculează și trasează pornind de la parametrii cunoscuți ai motorului de tracțiune.

Caracteristica de mers în gol $E(I)$ a motorului ridicată pentru o viteză $V_1$ este cunoscută. Ea se ridică experimental pentru o turație $n_1$ (din care la obadă rezultă $V_1$), motorul fiind cu excitație separată (se deconectează excitația serie). Din $E(I)$ pentru $V_1$ se deduce rețeaua de caracteristici $E(I)_{V_1,V_2..}$ prin simpla multiplicare a ordonatelor $(E = K\Phi V)$, ca în diagrama din figura 2.106.

Din caracteristica $C(I)$ a motorului, raportată la obadă, rezultă $F_m(I)$ care se multiplică cu numărul motoarelor (curba $F_m$ din fig. 2.107). Din caracteristica $F_m(I)$ rezultă caracteristica $F_f(I)$ folosind relația $F_f(I) \frac{F_m(I)}{\eta_T \eta_m^2}$, în care:

$\eta_T$ este randamentul transmisiei ($\eta_T = 0{,}98$ pentru calcule practice);

$\eta_m$ — randamentul motorului ($\eta_m = 0{,}94$ pentru calcule practice) și intervine la pătrat întrucît se referă la caracteristicile „motor" pentru a deduce caracteristicile „generator".

Caracteristicile $F_m(I)$ și $F_f(I)$ deduse sînt trasate în figura 2.107.

Pentru o valoare a reostatului de frînare $R_f$, în cazul unei singure mașini rezultă:

$E = (R_f + r)I$ care este o dreaptă și care trasată pe figura 2.106 determină punctele de funcționare $P_1, P_2, P_3 \cdots$ cărora le corespund curenții $I_1, I_2, I_3 \cdots$ În cazul unei scheme cu mai multe motoare $R_f$ și $r$ se multiplică reciproc prin numărul de mașini legate în serie pe ramură și ramuri în paralel.

La curenții $I_1$, $I_2$, $I_3$ ··· din diagrama 2.106, rezultă respectiv $F_1$, $F_2$, $F_3$ ··· în diagrama 2.107 care combinate respectiv cu $V_1$, $V_2$, $V_3$ ··· dau punctele $P'_1$, $P'_2$, $P'_3$ ···· care unite conduc la caracteristica $F_f(V)$ pentru valoarea $R_f$ a reostatului de frînare. Punctul $P'_4$ unde caracteristica $F_f(V)$ intersectează axa vitezelor, determină viteza $V_4$ la care frînarea nu mai acționează ($F_f = 0$).

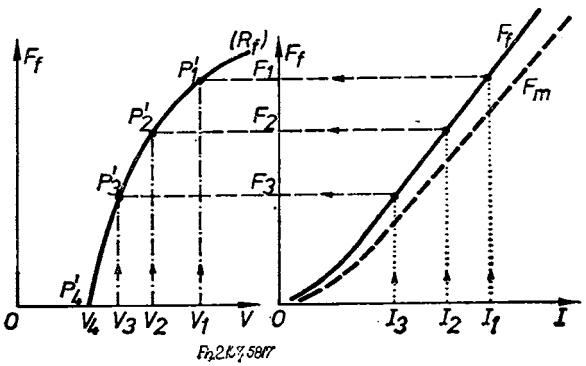



*Fig. 2.107.* Trasarea caracteristicii de frînare $F_f(v)$ pentru o treaptă dată a reostatului de frînare ($R_f$).

La trasarea caracteristicii $F_f(V)$ ca mai sus s-a pornit de la $E(I)$ la mersul în gol al motorului. În realitate trebuie luată în considerare $E(I)$ în sarcină pentru a ține seamă de distorsiunile cîmpului datorate reacției indusului. Caracteristica $E(I)$ în sarcină are aspectul mai căzător de la o anumită sarcină în sus (fig. 2.108) ceea ce conduce la înclinarea curbei $F_f(V)$ la partea ei superioară (fig. 2.109). Pe de altă parte randamentul este mai mic la sarcini reduse, iar $F_f$ care este invers proporțional cu pătratul randamentului ($\eta_m^2$) este mai puțin căzătoare în partea inferioară.

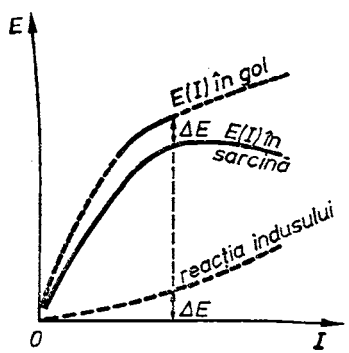



*Fig. 2.108.* Caracteristica $E(I)$ în sarcină a unei mașini serie.

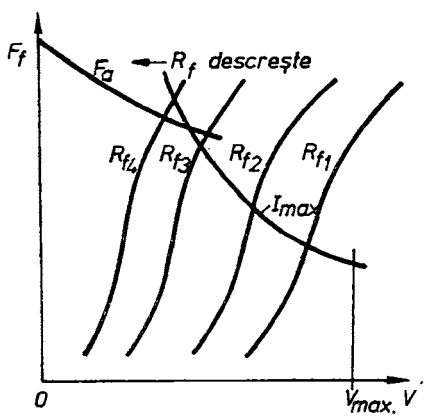



*Fig. 2.109.* Caracteristicile de frînare reostatică, avînd ca parametru rezistența de frînare ($R_f$).

Reglarea forței de frînare se obține prin variația valorii rezistenței de frînare (reostatul de frînare se construiește în trepte) rezultînd atîtea caracteristici cîte trepte are reostatul (v. fig. 2.109). Cînd locomotiva circulă în regim de tracțiune cu $V_{max}$, deci motoarele sînt în cîmp redus, mai întîi se deșuntează

regresiv motoarele pînă se ajunge la cîmp plin și apoi se trece la regim de frînă, reducînd $R_f$ treaptă cu treaptă.

O elasticitate cît mai mare în exploatare, în regim de frînare reostatică, este asigurată dacă se dispune de un număr mare de caracteristici $F_f(V)$ lucru ce se obține prin treptele de rezistență de frînare. În regim de generator parametrii funcționali ai mașinii sînt evident limitați (curent, tensiune) care impun și limitările respective pentru caracteristicile $F_f(V)$ și deasemenea mai apare și o limitare după forța de aderență a locomotivei și viteza maximă constructivă. Aceste limitări se trasează pe caracteristicile $F_f(V)$ și în acest fel se determină planul $F_f(V)$ ca domeniu de aplicabilitate a frînării.

Viteza maximă constructivă a locomotivei este un parametru dat, iar limitarea este reprezentată prin verticala dusă în punctul $V_{max}$ (fig. 2.109).

Forța de tracțiune limitată de aderență, $F_a = G_a\varphi$, este și limitarea pentru $F_f(V)$; $G_a$ — greutatea aderentă a locomotivei și $\varphi$ — coeficientul de aderență.

Curentul $I_{max}$ luat în considerare la calculul reostatului de frînare dă pentru fiecare valoare a lui $R_f$ forța de frînare $F_f$ corespunzătoare, care unită prin puncte asigură limitarea după $I_{max}$.

*e) Stabilitatea mecanică a frînării reostatice.* Stabilitatea mecanică în funcționarea frînei reostatice este o condiție obligatorie, care este îndeplinită dacă, la o creștere a vitezei pe pantă, crește și forța de frînare pentru a limita tendința de sporire a vitezei.

Dacă la o creștere a vitezei ar corespunde o scădere a forței de frînare, viteza ar crește în continuare și frînarea electrică nu își îndeplinește funcția sa de menținere a vitezei pe pantă.

Invers, la o scădere a vitezei trebuie ca și forța de frînare să scadă, altminteri, dacă forța de frînare ar crește, aceasta ar produce o scădere și mai mare a vitezei, ceea ce ar conduce la oprirea trenului.

Pentru a deduce condiția necesară stabilității mecanice a frînării, în diagrama din figura 2.110 s-au trasat trei aluri de caracteristici de frînare *I*, *II*, *III* și aspectul caracteristicii forței rezistente a trenului pe pantă (curba *IV*).

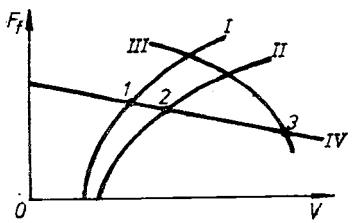


*Fig. 2.110.* Stabilitatea mecanică a frînării reostatice.

Forța rezistentă pe pantă se trasează conform relației:

$$F_r = (i - r)\,Q\ [\text{kg}],$$

în care:

$i$ este panta, în ‰;

$r$ — rezitența specifică la rulare, în kg/t;

$Q$ — greutatea trenului, în t.

Curba este ușor căzătoare, întrucît pentru o pantă $i$ dată, rezistența la rulare $r$ crește cu viteza.

Punctele *1* și *2* reprezintă regimuri de funcționare stabilă din punctul de vedere mecanic al frînării, conform definiției, iar punctul *3* regim instabil.

Din diagramă rezultă condiția generală a stabilității mecanice:

$$\frac{dF_f}{dV} > \frac{dF_r}{dV}.$$

Examinînd aspectul de variație al caracteristicilor $F_f(V)$ (fig. 2.109) se constată că frînarea reostatică cu generator tip serie prezintă stabilitate mecanică.

2.11.3. **Calculul reostatului de frînare şi diagrama** $V_f(I)$. Din caracteristica de frînare (fig. 2.109) se observă că pentru o rezistenţă de frînare dată, la scăderea vitezei scade şi forţa de frînare şi ca atare scade şi decelerafia. Ori, pentru menţinerea constantă a forţei de frînare pe perioada de frînare trebuie ca pe măsura reducerii lui $V$ să scadă $R_f$, adică trebuie găsită o lege de variaţie $R_f(V)$ pentru satisfacerea condiţiei de a menţine decelerafia constantă (fenomen similar ca la demaraj).

Din ecuaţia f.e.m. a generatorului în regim de frînă avem:

$$K\Phi V_f = (r + R_f)I, \text{ respectiv } R_f = \frac{K\Phi V_f}{I} - r \tag{1}$$

Pentru $I = \text{const}$, $K\Phi = \text{const}$ (generator serie), deci $R_f = KV_f - r$ care arată că $R_f$ trebuie să varieze linear cu $V$. Întrucît reglarea continuă a rezistenţei de frînare conduce la complicaţii constructive, se admite reglarea lui $R_f$ în trepte a căror număr şi valoare admiţînd o oscilaţie a curentului de frînare între $I_{max}$ şi $I_{min}$ astfel ca şocurile mecanice ce apar să nu fie dăunătoare. Metoda grafo-analitică de calcul este prezentată în figura 2.111 şi este similară cu aceea folosită la calculul reostatului de demaraj.

Curentul maxim de frînare $I_{max}$ se admite în jurul valorii $I_{uniorar}$ din regim de tracţiune, iar $I_{min} = (0{,}8 \ldots 0{,}9)\ I_{max}$ pentru a rezulta o oscilaţie a forţei de frînare admisă practic la $F_{max}/F_{min} = 1{,}1 \ldots 1{,}2$.

Pentru $V_f = 0$, din relaţia (1) rezultă $R_f = -r$ care determină un punct de pe dreapta $R_f(V)$.

Un al doilea punct al dreptei (limitat de $I_{max}$) se află dînd o valoare arbitrară vitezei de frînare (de ex. $V_f = V_{max}$ constructiv) calculînd pe $K\Phi$ (pentru $I_{max}$) din caracteristica $V(I)$ la tensiunea nominală în regim motor $\left( K\Phi = \dfrac{U - rI_{max}}{V_{max}} \right)$ şi cu aceste valori introduse în (1) rezultă $R_{f1}$. Punctul $A$ va avea deci coordonatele $(R_{f1}, V_{max})$ care unit cu punctul $(-r, 0)$

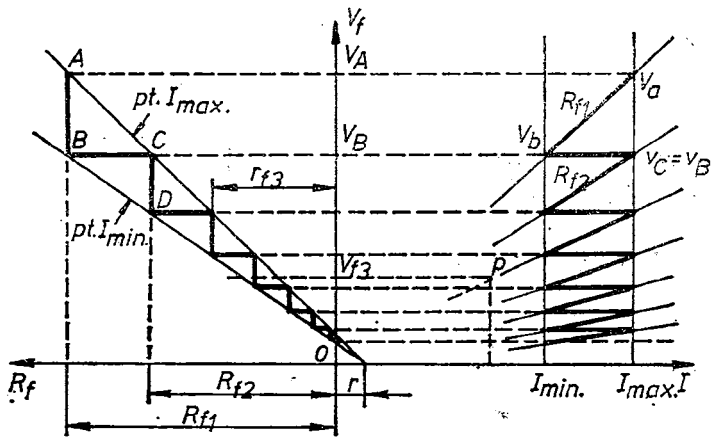



*Fig. 2.111.* Metodă grafo analitică pentru calculul reostatului de frînare.

determină drepta $R_f(V_f)$ limită după $I_{max}$. Pentru aceeaşi rezistenţă de frînare $R_{f1}$, însă pentru $I_{min}$ şi $K\Phi$ calculat ca mai sus pentru $I_{min}$, cu relaţia (1) se calculează:

$V_{f(B)} = \dfrac{R_{f1} + r}{K\Phi_{(I\ min)}}$ care determină punctul $B(R_{f1}, V_{f(B)})$ de pe dreapta $R_f(V_f)$ limită după $I_{min}$.

Treptele de rezistență (număr și valoare) rezultă construind zigzagul $ABCD \ldots$; verticala din $A$ determină valoarea maximă a reostatului $R_{f1}$. Între $A$ și $B$ curentul variază de la $I_{max}$ la $I_{min}$, iar viteza de la $V_a$ la $V_b$ cînd micșorînd rezistența curentul va crește din nou la $I_{max}$ (punctul $C$), iar verticala prin $C$ determină pe $R_{f2} \ldots$ s-a presupus că în timpul trecerii de la o treaptă la alta $V$ se menține constantă datorită inerției trenului.

În zona vitezelor mici, se observă din diagramă, pentru acoperirea unei zone înguste de viteză rezultă multe trepte de reostat ceea ce complică nejustificat construcția, de aceea în mod practic de la viteze mici pînă la oprire se acționează cu frîna pneumatică. În această construcție grafică apar și caracteristicile $V_f(I)$ avînd ca parametru $R_f$; pe fiecare caracteristică apar cîte două puncte ($V_a$, $V_b \ldots$), iar printr-un raționament analog se pot construi și alte puncte luînd valori arbitrare pentru $I$. Așa spre exemplu pentru găsirea încă a unui punct pe caracteristica $V_f(I_f)$ pentru $R_{f3}$, se ia arbitrar $I_3$ pentru care se calculează ca mai sus $V_{f3}$; orizontala prin $V_{f3}$ cu verticala prin $I_3$ determină punctul $p$ situat pe $V_f(I_f)$ pentru $R_{f3} \ldots$

Dacă se frînează reostatic de la $V_{max}(V_a)$ cu treapta de rezistență $R_{f1}$, curentul de frînare crește brusc de la zero la $I_{max}$ producînd șocuri mecanice. Pentru limitarea șocului de curent, respectiv forță de frînare, se mai construiesc cîteva caracteristici deasupra limitării lui $I_{max}$ care determină tot atîtea valori $R_f$ sub cea maximă.

**2.11.4. Frînarea reostatică folosind generator cu excitație separată.** Frînarea reostatică mai poate fi realizată folosind generatorul cu excitație separată ($Ex$), adică la trecerea în regim de frînare se schimbă sistemul de excitație al mașinii, din motor serie devine generator cu excitație separată.

În figura 2.112 este prezentată schema de principiu a frînării reostatice în această variantă, pentru o locomotivă cu patru motoare.

Generatoarele se conectează fie separat fie cîte două în serie și debitează pe o rezistență de frînare de valoare fixă ($R_f$). Excitațiile separate se leagă toate în serie, iar curentul de excitație este furnizat de o excitatrice antrenată de un motor ($m$—$g$).

Generatorul avînd excitație constantă, forța lui electromotoare $E = k \cdot n \cdot \Phi = (r + R_f)I$ este proporțională cu turația, respectiv cu viteza locomotivei și deci și intensitatea debitată $I$ este proporțională cu viteza.

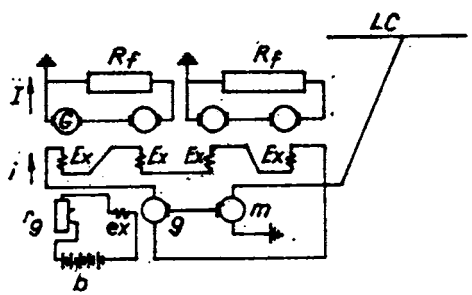



*Fig. 2.112.* Schema de principiu a frînării reostatice folosind generator cu excitație separată.

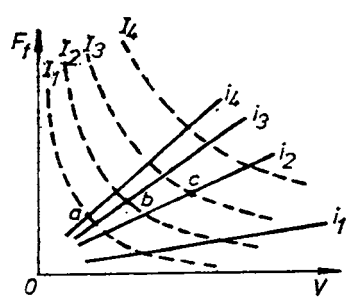



*Fig. 2.113.* Caracteristicile de frînare reostatică, în soluția generator cu excitație separată.

Cum cuplul este proporțional cu $I$, deci și cu forța de frînare, rezultă că pentru o valoare a curentului de excitație $i$, caracteristica de frînare $F_f(V)$ este o dreaptă. Prin variația curentului de excitație, care se obține cu ajutorul reostatului ($r_g$) din circuitul excitatricei, se obțin caracteristicile de frînare în evantai, ca în diagrama din figura 2.113.

Pentru valori mari ale curentului de excitație $i$, datorită efectului de saturație a generatorului, curbele $F_f(V)$ se apropie.

Dacă se dorește obținerea unei forțe de frînare sensibil constantă, trebuie sporită excitația pe măsură ce viteza descrește. Punctele de funcționare $a$, $b$, $c$, se deplasează în planul $F_f(V)$ pe hiperbolele de putere constantă, $P_f = UI = R_f \cdot I \cdot I = R_f I^2$, corespunzătoare la diverse valori $I_1$, $I_2$, $I_3$.

2.11.5. **Frînarea recuperativă.** Frîna recuperativă prezintă particularitatea că motoarele de tracțiune funcționînd în regim de generatoare sînt puse să debiteze în paralel pe linia de contact a cărei tensiune ($U_{LC}$) variază între anume limite. O primă condiție a frînării recuperative este deci ca f.e.m. a generatorului ($E$) să fie mai mare decît tensiunea liniei de contact ($E > U_{LC}$), ceea ce conduce la concluzia că frînarea recuperativă nu poate fi utilizată ca frînă de oprire, ci numai ca frînă de menținere a trenului pe pante.

2.11.5.1. *Stabilitatea electrică a generatorului serie, funcționînd în regim de frînă recuperativă.* Cea mai simplă schemă electrică ar rezulta dacă de la regim motor serie s-ar trece la regim de frînă recuperativă folosind generator serie (ca și în cazul tratat la frîna reostatică).

În procesul tranzitoriu (de la $I_f = 0$ la $I_f = \text{const}$) ecuația acestui regim, considerînd $V = \text{const}$, este:

$$E = K\Phi V = (U_{LC} + rI) + L\frac{dI}{dt},$$

$U_{LC}$ este tensiunea liniei de contact pe care debitează generatorul, presupusă constantă;

$I$ — curentul debitat de generator (curentul de frînare).

Din ecuația (1) rezultă:

$$L\frac{dI}{dt} = K\Phi V - (U_{LC} + rI), \tag{2}$$

a cărei reprezentare grafică este arătată în figura 2.114.

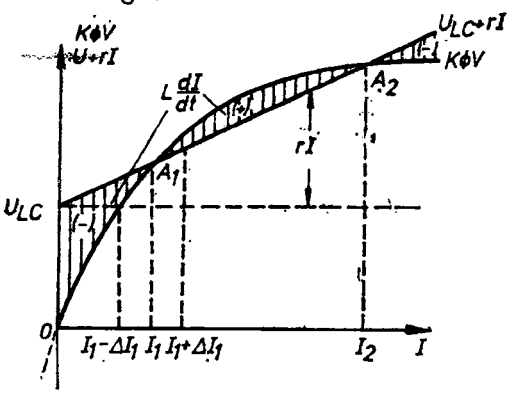



*Fig. 2.114.* Diagrama stabilității electrice a generatorului serie în regim de recuperare.

Suprafața hașurată reprezintă termenul $L\frac{dI}{dt}$ (tensiunea autoindusă în circuit), semnul suprafeței fiind semnul derivatei $\frac{dI}{dt}$.

$A_1$ este un punct instabil de funcționare (deși el se află în zona valorilor normale ale curentului mașinii):

— la creșterea curentului $I_1$ (adică $I_1 + \Delta I_1$), reacția ce apare în circuit $L\frac{dI}{dt} > 0$ face să crească $I_1$, în continuare pînă la valoarea $I_2$ corespunzătoare punctului $A_2$; punctul $A_2$ este într-adevăr un punct stabil de funcționare, după cum se poate observa din figură, însă stabilizarea are loc la un curent $I_2$ exagerat de mare pentru care nu a fost dimensionată mașina;

— la o scădere a curentului $(I_1 - \Delta I_1)$ reacția ce apare în circuit $L\frac{dI}{dt} < 0$ trage curentul în jos, $I_1 = 0$ apoi schimbă de semn (curba figurată punctat) cînd generatorul în loc să debiteze curent $I_1$ în linia de contact, din contră el absoarbe curent din linia de contact și deci nu mai lucrează în regim de generator.

În consecință, *generatorul cu autoexcitație serie nu prezintă stabilitate electrică* în regim de frînă recuperativă și ca atare la trecerea din regim motor serie în regim frînă recuperativă trebuie schimbat și sistemul de excitație.

2.11.5.2. *Utilizarea generatoarelor anticompund sau cu excitație separată în regim de frînă recuperativă.* În figura 2.115 și 2.116 s-au reprezentat caracteristicile interne $E = K\Phi V(I)$ pentru un generator cu excitație anticompund (caracteristică pronunțat căzătoare) și un generator cu excitație separată (caracteristică ușor căzătoare).

Examinarea acestor caracteristici, pe baza unui raționament ca mai sus, arată că există un singur punct de echilibru $A$ căruia îi corespunde un curent $I_1$ atunci cînd funcționează în paralel pe o rețea de tensiune $U_{LC}$, deci, ambele tipuri de generatoare prezintă stabilitate electrică în regim de frînă recu-

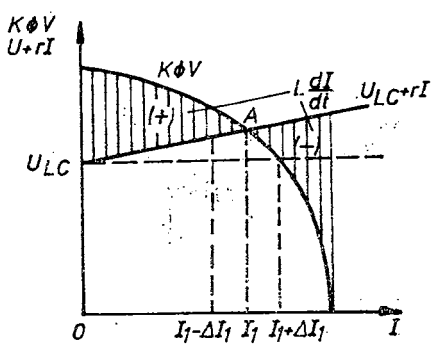



*Fig. 2.115.* Stabilitatea electrică a generatorului anticompund în regim de recuperare.

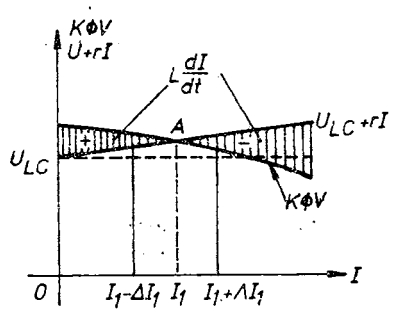



*Fig. 2.116.* Stabilitatea electrică a generatorului cu excitație separată în regim de recuperare.

perativă. Generatorul cu excitație derivație din punct de vedere al stabilității electrice, funcționînd pe o rețea de tensiune constantă, se comportă ca și generatorul cu excitație separată.

În scopul diferențierii celor două tipuri de generatoare din punct de vedere funcțional, în figura 2.117 s-au prezentat două caracteristici $E(I)$ pentru

generator anticompund (curba 2) și generatorul cu excitație separată (curba 1), ambele funcționînd pe o rețea de tensiune $U_{LC}$ și ambele debitînd în rețea curentul $I$.

Dacă tensiunea rețelei variază (cazul curent al tensiunii din linia de contact) la $U_1$ (scade), curentul debitat (curentul din indus) de generatorul anti-

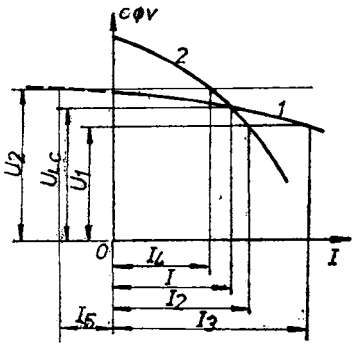



*Fig. 2.117.* Comportarea generatoarelor anticompund și cu excitație separată în regim de recuperare, la variația tensiunii în linia de contact.

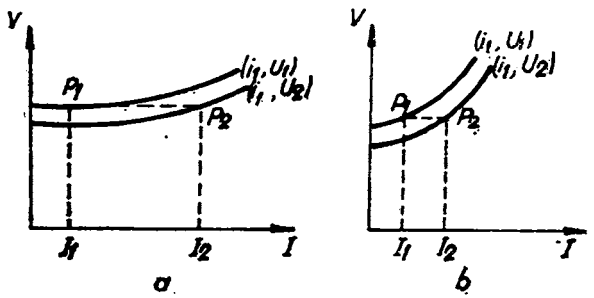



*Fig. 2.118.* Caracteristicile $V(I)$ la un generator cu excitație separată: *a* — caracteristica naturală rigidă; *b* — caracteristică elastică dorită.

compund va trebui să crească la $I_2$, iar al generatorului cu excitație separată la $I_3$.

Dacă tensiunea rețelei crește la $U_2$, curentul $I_4$ corespunde generatorului anticompund, iar curentul $I_5$ generatorului cu excitație separată care arată că el trece în regim de motor ($I_5$ este negativ și deci absorbit din linia de contact). Rezultă că variația tensiunii din rețea provoacă variații relativ mici ale curentului recuperat în cazul unui generator anticompund și variații mari ale curentului în cazul generatorului cu excitație separată; generatoarele cu excitație anticompund se comportă net superior față de generatorul cu excitație independentă în regim de frînă recuperativă.

În practică se folosește, ca soluție generalizată, generatorul cu excitație separată fiindcă oferă posibilitatea ușoară de a regla caracteristica de frînare, prin variația curentului de excitație, însă cu luarea unor măsuri în schemă pentru stabilizarea curentului recuperat la variația tensiunii din rețea. Generatorul anticompund, evident este o construcție mult mai complicată.

*Elasticitatea frînării recuperative.* În cazul unui generator cu excitație separată, din ecuațiile de bază:

$$E = k \cdot V \cdot \Phi\,; \quad E = U + rI,$$

rezultă:

$$V = \frac{U + rI}{k \cdot \Phi}.$$

Pentru o viteză a trenului dată ($V$ = const) și o excitație în înfășurarea separată menținută la aceeași valoare $i_1$, la o variație a tensiunii de la $U_1$ la $U_2$ ($U_1 > U_2$), curbele $V(I)$ au aspectul din figura 2.118.

Cînd generatorul debitează un curent $I_1$ sub o tensiune $U_1$, punctul de funcționare va fi $p_1$. O variație a tensiunii la valoarea $U_2$ va muta punctul de funcționare în $p_2$, ceea ce atrage o variație mare a curentului de la valoarea $I_1$ la $I_2$ (fig. 2.118, *a*). Cum forța de frînare depinde de curentul $I$, variațiile mari ale acestuia vor antrena variații bruște și pentru forța de frînare. Este obligatoriu să se prevadă un sistem de stabilizare a curentului recuperat pentru a se obține, pe cît posibil, o forță de frînare independentă de variațiile de tensiune ale liniei de contact, care de altminteri impune și tensiunea generatorului, acesta lucrînd în paralel pe ea.

Variațiile curentului, respectiv ale forței de frînare, pot fi atenuate introducînd o rezistență-tampon în serie cu generatorul, însă consumul în rezistență va fi în detrimentul energiei recuperate; $I = \frac{\Delta U}{R+r}$, $R$ fiind rezistența tampon.

O diminuare a variațiilor de curent are loc atunci cînd curbele $V(I)$ au un aspect pronunțat ascendent, ca în figura 2.118, *b* (caracteristică elastică), și care pot fi obținute atunci cînd, la o creștere a curentului debitat $I$, are loc o scădere a fluxului $\Phi$, după cum rezultă din relația de mai sus.

Caracteristicile $V(I)$ din figura 2.118, *b* (caracteristică elastică) sînt proprii generatorului anticompund.

În schemele efectiv realizate pe locomotivele de curent continuu, pentru frînare recuperativă, se are în vedere rezolvarea stabilizării curentului recuperat, bazată pe principiile enunțate.

2.11.5.3. *Frînarea recuperativă folosind generator cu excitație separată și excicatrice anticompund.* Schema de principiu este redată în figura 2.119. Înfășurarea de excitație separată a excitatricei $Ex_{gh}$ este alimentată cu o tensiune constantă și deci va da un flux constant. Înfășurarea de excitație $Ex_{gs}$ va da un flux antagonist, variabil după valoarea curentului total $I$ debitat de generator. Fluxul rezultant și respectiv curentul de excitație $I_e$ scade atunci cînd $I$ crește; este îndeplinită condiția din figura 2.118, *b*, adică variația fluxului, respectiv a curentului de excitație, este în sens invers cu cea a curentului recuperat.

În practică este dificil de a realiza pe o mașină mică, așa cum este excitatricea, înfășurarea serie care să fie parcursă de un curent așa mare cum

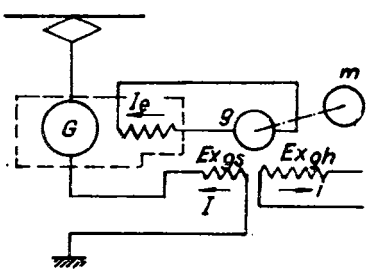



*Fig. 2.119.* Schema de principiu a frînei electrice recuperative cu generator cu excitație separată și excitatrice anticompund: *G* — generatorul; *m* — *g* grupul motor-excitatrice anticompund.

este cel debitat de generator. De aceea, în mod curent, înfășurarea $Ex_{gs}$ se branșează la bornele unui șunt inductiv *R*, *B* înseriat în circuitul principal, ca în schema din figura 2.120.

2.11.5.4. *Frînarea recuperativă cu generator cu excitație separată și rezistență de stabilizare.* Schema de principiu este redată în figura 2.121. Aplicînd *legea lui Kirchoff* la circuitul închis de excitație se poate scrie:

$$e = R(I + i) + r \cdot i,$$

de unde:

$$i = \frac{e - R \cdot I}{R + r}.$$

Pentru o excitație dată în înfășurarea de excitație a excitatricei, forța electromotoare a excitatricei $e$ este constantă, iar orice variație a curentului

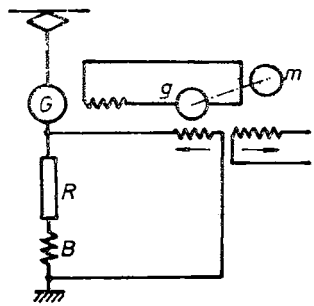



*Fig. 2.120.* Realizarea practică a principiului prezentat în schema din figura 2.119.

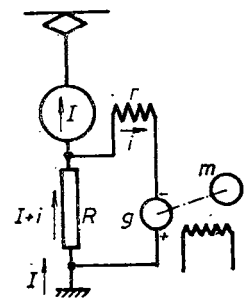



*Fig. 2.121.* Schema de principiu a frînei electrice recuperative cu generator cu excitație separată și rezistență de stabilizare.

recuperat $I$ se repercutează în sens invers asupra curentului de excitație din înfășurarea generatorului; este astfel îndeplinită condiția din figura 2.118, *b*.

Dezavantajul schemei constă în consumul de energie în rezistența de stabilizare $R$.

2.11.5.5. *Caracteristica de frînare.* Notînd cu:

$I$ — curentul recuperat (debitat de generator);

$i$ — curentul de excitație (din înfășurarea de excitație separată);

$r$ — rezistența internă a generatorului (indus + polii auxiliari),

pentru o valoare dată a curentului de excitație (constantă) se poate scrie: forța de frînare $F_f = \alpha\Phi I = K_1 I \cdots (1)$, unde $K_1 = \alpha\Phi$;

$$E = \beta\Phi\, V = U + rI;\ V = \frac{U + rI}{\beta\Phi} = K_2\, U + K_2 rI \ldots (2) \text{ unde } K_2 = \frac{1}{\beta\Phi}.$$

Din (2) rezultă $I = \dfrac{V - K_2 U}{K_2 r}$ care introdus în (1) dă:

$$F_f = K_1 \frac{V - K_2 U}{K_2 r} = \frac{K_1}{K_2 r} V - \frac{K_1}{r} U \ldots \qquad (3)$$

Reprezentarea grafică a ecuației (3) este dreapta $F_f(V)$, pentru un $i =$ = const, reprezentată punctat în figura 2.122 la care panta este dată de

$\frac{K_1}{K_2 r} = \frac{\alpha\beta\Phi^2}{r} = K'\Phi^2$, iar abscisa la origină este dată de $\frac{K_1}{K_2 r} V - \frac{K_1}{r} U = 0$;

$V_0 = K_2 U = \frac{U}{\beta\Phi}$;

din cauza reacției indusului, caracteristica reală este puțin curbată (caracteristica trasată cu linie plină).

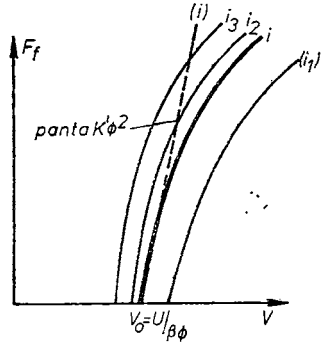



*Fig. 2.122.* Alura caracteristicilor de frînare recuperativă.

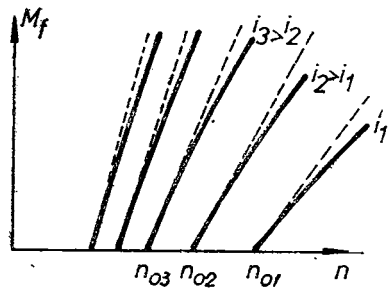



*Fig. 2.123.* Caracteristici $M_f(n)$, cu parametru curentul de excitație $(i)$.

Variind curentul de excitație ($i_1$, $i_2$ ···) se obține familia de caracteristici $F_f(V)$ dispuse în evantai, și ca atare variația forței de frînare.

*Trasarea caracteristicilor de frînare recuperativă și limitările lor.* Pentru o excitație constantă, neglijînd reacția indusului, fluxul $\Phi$ este sensibil constant.

$$E_1 = k \cdot n\Phi_1$$

și deci:

$$E = \frac{n}{n_1} E_1,$$

sau

$$U + rI = \frac{n}{n_1} E_1,$$

de unde:

$$I = \frac{n}{n_1} \cdot \frac{E_1}{r} - \frac{U}{r} = \frac{n}{n_1} \frac{E_1}{r} \left( n - \frac{U}{E_1} n_1 \right) = \frac{1}{n_1} \frac{E_1}{r} (n - n_0),$$

în care s-a notat:

$$n_0 = \frac{U}{E_1} n_1.$$

Cuplul de frînare, avînd expresia

$$M_f = k \cdot \Phi \cdot I = k'I = \frac{k'}{n_1} \cdot \frac{E_1}{r} (n - n_0),$$

rezultă că $M_f(n)$ vor fi drepte, a căror reprezentare s-a trasat punctat pe figura 2.123. Din cauza reacției indusului, curbele $M_f(n)$ se curbează ușor, așa cum sînt reprezentate cu linie plină pe aceeași figură.

Prin variația curentului de excitație ($i_1$, $i_2 \cdots i_n$) variază deci, și $F_1$, rezultînd fasciculul de curbe $M_f(n)$. Pe măsura creșterii lui $i$ vitezele de mers în gol $n_0$ scad din ce în ce mai lent, din cauza saturației.

Trecerea de la caracteristicile $M_f(n)$ la $F_f(V)$ se face utilizînd relațiile similare de la regim de tracțiune sau regim de frînare reostatică ținînd seamă de randamentul $\eta'$ și pierderea $r \cdot I^2$, adică:

$$F_f V = 0{,}367 \frac{1}{\eta'} \cdot U \cdot I; \quad U \cdot I = E \cdot I - r \cdot I^2; \quad E = \frac{V}{V_1} E_1; \quad \eta' = \eta_T \eta_G,$$

în care:

$\eta_T$ este randamentul transmisiei;

$\eta_G$ — randamentul generatorului.

$$F_f = 0{,}367 \frac{1}{\eta'} \left( I \frac{E_1}{V_1} - \frac{r \cdot I^2}{V_1} \right);$$

au

$$V = V_1 \frac{U + rI}{E_1};$$

$$I = \frac{1}{r} \cdot \frac{E_1}{V_1} (V - V_0);$$

unde s-a notat:

$$V_0 = \frac{U}{E_1} V_1.$$

Eliminînd pe $I$, rezultă:

$$F_f = 0{,}367 \frac{1}{\eta'} \cdot \frac{U \cdot E_1}{r \cdot V_1} \left( 1 - \frac{U}{E_1} \cdot \frac{V_1}{V} \right).$$

Alura caracteristicilor $F_f(V)$ este reprezentată în figura 2.124.

Din examinarea aspectului caracteristicilor $F_f(V)$ se constată că frînarea recuperativă prezintă stabilitate mecanică; $F_f$ variază în același sens cu $V$.

S-a precizat că pentru realizarea stabilizării curentului recuperat trebuie să existe o lege de variație inversă între curentul recuperat $I$ și curentul de excitație $i$. Valoarea practică a raportului $\frac{I}{i}$ se limitează la 2 ... 3, din considerente de comutație.

În mod teoretic, se trasează și caracteristicile $F_f(V)$ pentru $I$ = const., care reprezintă un fascicul de hiperbole echilatere, avînd ca asimptote axele $OF_f$ și $OV$, și admițînd randament constant.

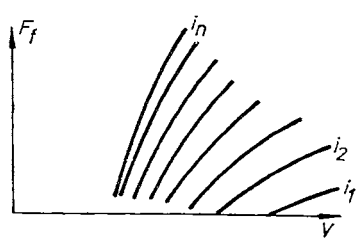



*Fig. 2.124.* Caracteristicile $F_f(V)$, cu parametru curentul de excitație ($I$).

Cunoscînd și legea de variație care leagă curenții $I$ și $i$ se pot trasa caracteristicile reale $F_f(V)$ cu domeniul lor utilizabil dedus din cele două familii de curbe $F_f(V)$ la $i = \text{const.}$ și $I = \text{const.}$

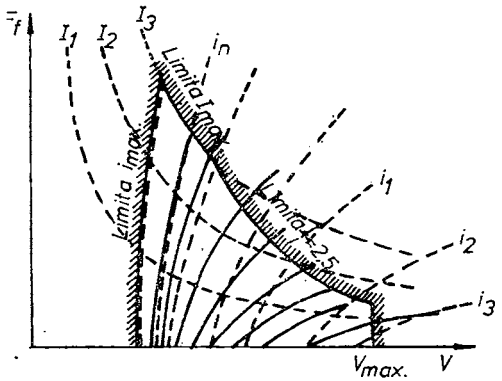



*Fig.2.125.* Caracteristicile $F_f(V)$ și domeniile de limitare.

Domeniul utilizabil este limitat de: viteza maximă, curentul $i$ maxim, curentul $I$ maxim și raportul $\frac{I}{i}$. Caracteristicile $F_f(V)$ cu limitările respective sînt indicate în figura 2.125.

## Capitolul 3

# LOCOMOTIVA ELECTRICĂ DE CURENT ALTERNATIV MONOFAZAT ȘI FRECVENȚA JOASĂ

Acest tip de locomotivă electrică este destinat sistemului de electrificare în curent monofazat cu tensiunea nominală de 15 kV și frecvența curentului de 16 2/3 Hz la linia de contact. Acești parametri sînt întîlniți în țările europene (R.F.G., R.D.G., Austria, Elveția, Suedia, Norvegia); în America frecvența curentului este de 25 Hz.

Datorită tensiunii ridicate la linia de contact, motoarele de tracțiune neputînd fi alimentate direct la această tensiune, pe locomotivă se instalează un transformator monofazat coborîtor de tensiune.

Motorul de tracțiune instalat pe locomotivă este monofazat cu colector, tip serie.

## 3.1. SCHEMA ELECTRICĂ DE PRINCIPIU

Majoritatea locomotivelor existente în exploatare sînt realizate pe principiul prezentat în schema din figura 3.1.

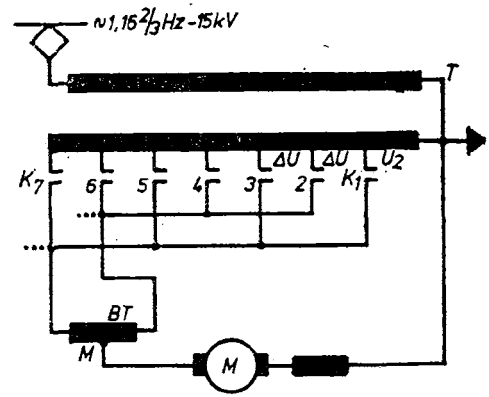



*Fig. 3.1.* Schema electrică de principiu a circuitului de forță la o locomotivă monofazată 16 2/3 Hz : $T$ — transformator principal; $K_1$, $K_2$ ... — contactoare de priză de tensiune; $BT$ — bobină de trecere (bobină divizoare — impedanță; $M$ — motor monofazat cu colector tip serie pentru tracțiune.

Locomotiva dispunînd de un transformator, există posibilitatea de a regla tensiunea aplicată la motor de la o valoare minimă pînă la tensiunea nominală a motorului.

În esență, schema locomotivei este simplă, nu necesită interconectări între motoarele de tracțiune, nu necesită reglarea excitației motoarelor și nici reostat de pornire în capul circuitului, ca în cazul locomotivelor de curent continuu.

Dacă notăm:

— $U_1$ tensiunea primară (tensiunea de intrare), respectiv $w_1$ numărul de spire ale înfășurării primare;

— $U_2$ tensiunea secundară (tensiunea de ieșire), respectiv $w_2$ numărul de spire ale înfășurării secundare.

Din ecuația de mers în gol a transformatorului $\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2}$ se deduce $U_2 = U_1 \frac{w_2}{w_1}$ de unde rezultă cele două moduri de a regla tensiunea $U_2$ ce se aplică la motorul de tracțiune:

— Prin variația lui $w_2$, menținînd $w_1$ același, adică $U_2 = K_1 w_2$ unde $K_1 = \frac{U_1}{w_1}$, iar $U_1$ este constant fiind tensiunea de la linia de contact, $U_{LC}$ (fig. 3.2). Această metodă este denumită *reglarea pe joasă tensiune*, sau pe secundarul transformatorului și este practicată ca soluție generalizată pe locomotivele de curent monofazat 16 2/3 Hz — 15 kV.

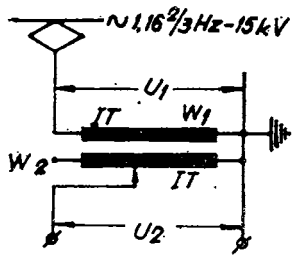


*Fig. 3.2* Schema reglării pe joasă tensiune.

— Prin variația lui $w_1$, păstrînd $w_2$ constant, adică $U_2 = K_2 \frac{1}{w_1}$ unde $K_2 = U_1 w_2$. Această soluție este denumită *reglarea pe înaltă tensiune*, sau pe primarul transformatorului și este practicată ca soluție generalizată pe locomotivele de curent monofazat 50 Hz — 25 kV (se va trata la acest capitol). În ultima vreme reglarea pe înaltă tensiune se aplică și la locomotivele monofazate 16 2/3 Hz de mare putere.

Reglajul pe joasă tensiune se obține prin secționarea înfășurării secundare a transformatorului în prize de tensiune, cu aceeași rație de tensiune $\Delta U$ între două prize consecutive (fig. 3.1) care se culege cu ajutorul contactoarelor de priză $K_1$, $K_2$ ... $K_7$ ... și deci reglajul este în trepte de tensiune. La construcțiile existente atît tensiunea inițială $U_2$ cît și rația de tensiune $\Delta U$ sînt de ordinul 40—50 V.

Reglarea tensiunii prin transformator trebuie să îndeplinească următoarele condiții:

— Trecerea de la o treaptă de tensiune la alta trebuie să se facă fără întreruperea curentului din circuitul de forță, altminteri apar șocuri la transmiterea forței de tracțiune.

— În timpul trecerii de la o treaptă la alta, spirele secției de bobinaj respectivă care asigură sporul de tensiune $\Delta U$ nu trebuie să fie scurtcircuitate franc (curentul de scurtcircuit ce se produce trebuie limitat), pentru a asigura integritatea transformatorului.

Aceste condiții se asigură simultan, folosind în schemă o bobină de inducție cu priză mediană, numită bobină de trecere (bobină divizoare) care se conectează cu un capăt la contactoarele de priză fără soț, iar celălalt la contactoarele de priză cu soț (fig. 3.1).

Valorile treptelor tensiunii de ieșire (trepte de reglare sau trepte de mers sau poziții de mers, cum sînt denumite în mod practic) și jocul contactoarelor, corespunzător figurii 3.1, sînt date în tabelul 3.1.

Motorul de tracțiune este alimentat de la punctul median al bobinei de trecere.

*Tabelul 3.1*

| Poziția | $C_1$ | $C_2$ | $C_3$ | $C_4$ | $C_5$ | $C_6$ | $C_7$ | Tensiunea de ieșire |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | × | × | — | — | — | — | — | $U_1 + \frac{1}{2}\Delta U$ |
| 2 | — | × | × | — | — | — | — | $U_1 + \frac{3}{2}\Delta U$ |
| 3 | — | — | × | × | — | — | — | $U_1 + \frac{5}{2}\Delta U$ |
| 4 | — | — | — | × | × | — | — | $U_1 + \frac{7}{2}\Delta U$ |
| 5 | — | — | — | — | × | × | — | $U_1 + \frac{9}{2}\Delta U$ |
| 6 | — | — | — | — | — | × | × | $U_1 + \frac{11}{2}\Delta U$ |

Bobina de trecere rămîne în permanență în circuit, și anume integral pe o treaptă de mers și jumătate în timpul trecerii, ea funcționînd ca un autotransformator cu raportul de transformare 1 : 2.

Trecerea de la o treaptă de reglare la alta se face prin deconectarea unui contactor (cel cu număr de ordine mai mic) și închiderea celui următor. De exemplu trecerea de la treapta de reglare cu $K_3$ și $K_4$ închiși se face deconectînd $K_3$ și închizînd $K_5$ astfel că următoarea treaptă va fi cu $K_4$ și $K_5$ închiși. Deci o treaptă de mers se asigură cu doi contactori succesiv închiși.

Niciodată nu vor trebui să existe două contactoare de aceeași paritate închise, întrucît în această situație se scurtcircuitează secțiunea de spire respectivă a înfășurării transformatorului. Datorită acestui fapt este necesar

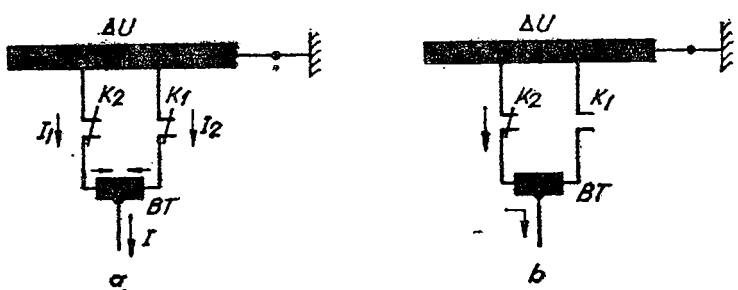



*Fig. 3.3.* Schema realizării treptelor de reglare și de trecere.

să se prevadă înzăvorîri între contactoare, pentru ca succesiunea de lucru a acestora să fie cea corectă.

Schema realizării unei trepte de reglare și a poziției de trecere este reprezentată în figura 3.3.

Pentru o treaptă de reglare, curenții din cele două jumătăți ale bobinei de trecere sînt egali și de sens contrar ($I_1 = I_2$) și ca atare amperspirele create de curentul motorului ($I$) în bobina de trecere sînt egale și de sens contrar și deci fluxurile ce se nasc în miezul bobinei se anulează și ca urmare în mod practic bobina de trecere nu introduce nici o reactanță suplimentară în circuitul motoarelor de tracțiune.

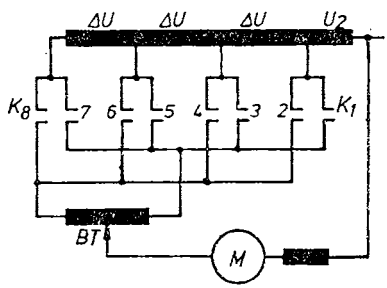



*Fig. 3.4.* Schemă de reglare cu două contactoare pe o priză de tensiune.

În poziția de trecere cînd se deschide un contactor, curentul de tracțiune nu se întrerupe, ci numai își diminuează valoarea (se elimină curentul ce trece prin contactorul deschis).

Din considerente de a realiza un demaraj lin și de a obține salturi de tensiune mici între trepte cu prize de tensiune puține pe transformator s-a recurs la schema cu două contactoare montate în paralel pe o priză de tensiune, ca în figura 3.4.

Jocul contactoarelor și valoarea treptelor de tensiune sînt redate în tabelul 3.2.

În această soluție se obțin trepte de reglare cînd bobina este legată la aceeași priză de tensiune ($K_1$, $K_2$ închise) dar și cînd bobina de trecere este legată la prize diferite ($K_2$, $K_3$ ··· închise).

*Tabelul 3.2*

| Poziția | $C_1$ | $C_2$ | $C_3$ | $C_4$ | $C_5$ | $C_6$ | $C_7$ | $C_8$ | Tensiunea de ieșire |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | × | × | — | — | — | — | — | — | $U_1$ |
| 2 | — | × | × | — | — | — | — | — | $U_1 + \frac{1}{2}\Delta U$ |
| 3 | — | — | × | × | — | — | — | — | $U_1 + \Delta U$ |
| 4 | — | — | — | × | × | — | — | — | $U_1 + \frac{3}{2}\Delta U$ |
| 5 | — | — | — | — | × | × | — | — | $U_1 + 2\Delta U$ |
| 6 | — | — | — | — | — | × | × | — | $U_1 + \frac{5}{2}\Delta U$ |
| 7 | — | — | — | — | — | — | × | × | $U_1 + 3\Delta U$ |

## 3.2. SCHEMA DE REGLARE FINĂ A TENSIUNII CU AJUTORUL REGULATORULUI FIN

Pentru a evita construcția secundarului transformatorului cu prea multe prize, ceea ce reprezintă o complicație constructivă și în scopul aplicării tensiunii la bornele motoarelor în trepte de tensiune mici (de ordinul a cîțiva

volți), la locomotivele monofazate 16 2/3 Hz cu reglajul pe joasă tensiune de concepție tehnică mai nouă, reglajul de tensiune în trepte a fost înlocuit cu reglajul fin de tensiune prin introducerea în schemă a unui regulator fin de tensiune, iar în locul bobinei de trecere se folosește un transformator survoltor.

Schema electrică de principiu a unei astfel de locomotive este prezentată în figura 3.5.

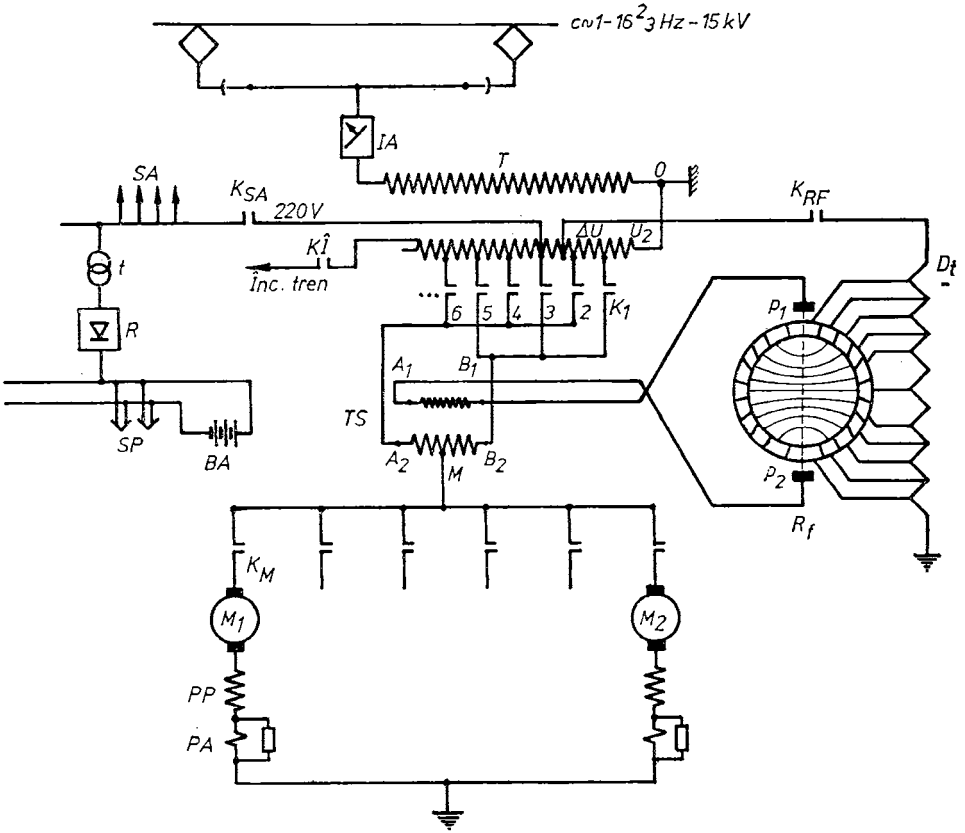



*Fig.3.5.* Schema de reglare fină a tensiunii cu regulator fin și transformator survoltor: $T$ — transformator principal; $TS$ — transformator survoltor; $R_f$ — regulator fin; $D_t$ — divizor de tensiune; $K_{1,2}$... — contactoare de priză; $M_{1,2}$ ... — motoare de tracțiune; $SA$ — servicii auxiliare; $t - R$ grup redresor; $SP$ — servicii proprii; $BA$ — baterie de acumulatoare.

*Construcția și funcționarea regulatorului fin.* Regulatorul fin este construit ca un colector fix, pe care se rotește o pereche de perii solidare mecanic între ele. Dispoziția schematică este redată în figura 3.6.

Colectorul este alcătuit din două lamele mai late *I* și *II* nelegate între ele și dintr-o serie de lamele mai înguste *1*, *2*, *3*, ... și *1'*, *2'*, *3'* ... legate între ele (*1* cu *1'*, *2* cu *2'*, *3* cu *3'* ...). Periile $p_1$, $p_2$, care se pot roti, freacă pe lamele (pentru simplificarea figurii s-au figurat în interior).

Fiecărei perechi de lamele i se aplică o tensiune, astfel ca ea să crească de la lamelă la lamelă cu aceeași rație. Întrucît colectorul este construit cu multe perechi de lamele, pentru a alimenta fiecare pereche de lamele de la secundarul transformatorului, ar însemna să fie utilizate prea multe prize și de aceea alimentarea colectorului se face de la un divizor de tensiune $D_t$ legat la o priză a secundarului cu ajutorul unui contactor $K_{Rf}$. Numărul spirelor divizorului de tensiune este determinat de numărul perechilor de lamele scurtcircuitate ale colectorului (*1—1'*; *2—2'*...), plus două spire pentru cele două lamele late *I* și *II*. Legînd borna *M* a divizorului de tensiune la o priză de tensiune $U_d$ a secundarului transformatorului și borna *N* la pămînt, prin rotirea periilor pe colector se poate aplica la bornele primarului transformatorului survoltor o tensiune de la zero la $U_d$.

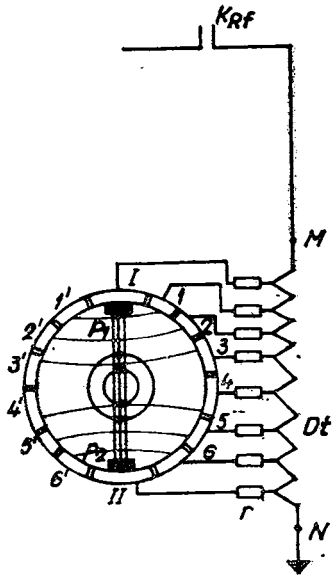


*Fig. 3.6.* Schema regulatorului fin.

Cînd periile $p_1$, $p_2$ calcă pe lamelele *I*, *II*, diferența de potențial între perii va fi evident $U_d$; cînd calcă pe lamelele *4—4'* care sînt scurtcircuitate, diferența de potențial între perii va fi zero.

Pe orice altă poziție intermediară, diferența de potențial între perii va fi cea corespunzătoare distanței de lamele *I*, *II*.

Dacă periile $p_1$—$p_2$ închid un circuit, atîta timp cît periile $p_1$ se mișcă pe jumătatea din dreapta a colectorului va curge un curent de la $p_1$ spre $p_2$; cînd peria $p_1$ trece pe jumătatea din stînga a colectorului, sensul curentului se schimbă.

Dacă se leagă periile la o înfășurare primară *TS* (fig. 3.5), pentru o rotire a lor de 90° se va induce o forță electromotoare într-un sens; continuînd rotirea periilor mai departe cu 90°, sensul forței electromotoare induse se va schimba.

Spirele divizorului de tensiune se leagă la lamelele colectorului prin intermediul unei benzi de rezistență *r*, pentru a micșora curentul de scurtcircuit în secția bobinajului $D_t$, intrată în comutație atunci cînd periile calcă pe mai multe lamele, caz identic ca la motoarele de tracțiune.

Conexiunea regulatorului fin $R_t$ pe locomotivă se face ca în figura 3.5, adică divizorul de tensiune $D_t$ este alimentat de la o priză a transformatorului *T* (în general la o tensiune de circa 200 V) iar periile $p_1$, $p_2$ sînt legate la primarul transformatorului auxiliar *TS*.

Raportul de transformare al transformatorului *TS* este astfel ales, încît, atunci cînd periile $p_1$, $p_2$ sînt pe lamelele late *I*, *II*, între punctele $A_2$ și $B_2$ să se inducă o tensiune egală cu $\Delta U$, corespunzătoare între două prize consecutive de la secundarul transformatorului *T*.

Aplicarea tensiunii pe motor (demarajul) se începe cu închiderea contactorului $K_1$ și poziția periilor pe lamelele late ale regulatorului. În această

situație, tensiunea aplicată pe motor va fi $U_m = U_2 - \frac{\Delta U}{2}$ care constituie și prima poziție de mers (tensiunea indusă la secundar, între $A_2B_2$, va fi $-\Delta U$ întrucît legăturile la transformatorul survoltor sînt încrucișate).

Poziția a doua de mers se obține rotind periile cu 180° cînd va rezulta $U_m = U_2 + \frac{\Delta U}{2}$, regulatorul se oprește, iar contactorul $K_2$ se închide fără nici o dificultate întrucît potențialul său este $U_2 + \Delta U$ adică potențialul ce îl are punctul $A_2$ pe această a doua poziție de mers.

Trecerea la poziția trei de mers se face prin deschiderea contactorului $K_1$ (potențialul lui $K_1$ și al punctului $B_2$ sînt aceleași $U_2$, deci nu se produce arc voltaic) și rotirea periilor cu încă 180°, regulatorul stă pe poziția cu periile pe lamelele late, și se închide contactorul $K_3$. În această situație tensiunea pe motor va fi $U_m = U_2 + U + \frac{\Delta U}{2} = U_2 + \frac{3\Delta U}{2}$; potențialul lui $K_3$ și punctul $B_2$ fiind aceleași $U_2 + 2\Delta U$, manevrarea lui se face fără pericolul de a se produce arc electric.

Trecerile la pozițiile de mers următoare se face în aceleași condiții ca mai sus. Pe fiecare poziție de mers, cu excepția primei poziții, sînt închise două contactoare succesive, iar regulatorul fin stă cu periile așezate pe lamelele late. Rezultă din cele de mai sus, că între două poziții de mers, rația de tensiune $\Delta U$ se aplică în salturi mici (de ordinul 2—3 V, în funcție de numărul lamelelor colectorului regulatorului și de tensiunea $U_{Rf}$ aplicată divizorului de tensiune $D_t$).

Dacă $n$ este numărul prizelor la secundarul transformatorului, iar $m$ numărul spirelor divizorului de tensiune $D_t$, atunci numărul total al treptelor de tensiune ce rezultă va fi,

$$Z = (n - 1) + (n - 2)(m - 2).$$

## 3.3. MOTORUL DE TRACȚIUNE MONOFAZAT TIP SERIE PENTRU FRECVENȚA 16 2/3 Hz.

3.3.1. **Principiul de funcționare.** Dacă unui motor serie de curent continuu i se aplică o tensiune alternativă monofazată corespunzătoare, el începe să se rotească, întrucît odată cu schimbarea sensului curentului din indus, simultan se schimbă și sensul fluxului în inductor, deci forța de atracție dintre curentul ce parcurge indusul și fluxul magnetic va acționa mereu în același sens, cu alte cuvinte cuplul păstrează un sens constant, cu toată natura curentului alternativ.

Funcționarea mașinii este însă complet necorespunzătoare datorită, în principal, următoarelor fenomene:

— fluxul magnetic alternativ provoacă în indus și în inductor mari pierderi prin curenții turbionari și prin fenomenul histerezis, conducînd la o excesivă încălzire a motorului;

— inductanța ansamblului indus și a celui inductor este mare, ceea ce determină un factor de putere scăzut;

— comutația motorului este mult agravată.

Realizarea unui motor de tracțiune monofazat cu funcționare corespunzătoare impune o serie de măsuri prin care se înlătură neajunsurile semnalate, conducînd la o tehnică specială a acestui motor și anume:

— construcția nu numai a polilor de excitație, ci și a statorului din tole, după practica obișnuită a mașinilor de curent alternativ, pentru reducerea pierderilor prin curenți turbionari și prin fenomenul histerezis;

— reducerea inductanței totale a motorului, prin introducerea unei înfășurări de compensație amplasată pe stator și care poate să fie pusă în serie cu inductorul și cu indusul, ca la mașinile de curent continuu (fig. 3.7,*a*), sau poate să fie scurtcircuitată (fig. 3.7, *b*), în care caz ea joacă rolul de secundar în scurtcircuit a unui transformator, avînd drept scop să distrugă inductanța primarului (în cazul de față indusul). Datorită acestei construc-

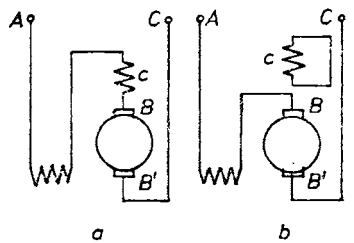



*Fig. 3.7.* Schema motorului monofazat compensat.

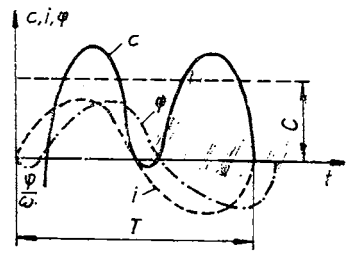



*Fig. 3.8.* Variația cuplului, în timp, la motorul monofazat serie.

ții se realizează motorul monofazat tip serie compensat. Unul din scopurile înfășurării de compensație, care reduce reactanța motorului este tocmai ameliorarea factorului de putere, ajungîndu-se la valori de 0,87 ... 0,91;

— luarea de măsuri speciale pentru ameliorarea comutației.

3.3.2. **Tensiunea electromotoare și cuplul.** La motorul serie monofazat, tensiunea electromotoare și cuplul au aceeași expresie ca și în cazul motorului de curent continuu:

$$E = \frac{p}{a} N \cdot n \cdot \Phi = k \cdot n\Phi;$$

$$C = \frac{p}{a} \cdot \frac{N}{2\pi} \Phi \cdot I = k' \cdot \Phi \cdot I;$$

în care $\Phi$ este valoarea eficace a fluxului pe pol.

Ținînd seamă de expresia cuplului (produsul dintre flux și curent) și de valoarea instantanee a curentului și a fluxului,

$$i = \sqrt{2} I \sin \omega t;$$

$$\varphi = \Phi \cdot \sin(\omega t - \psi),$$

în care $\psi$ este decalajul dintre curentul în rotor $i$ și fluxul inductor $\varphi$; o reprezentare grafică sugestivă a cuplului se prezintă ca în diagrama din figura 3.8.

Din diagramă se observă că la motorul monofazat cuplul este mereu pozitiv (fluxul și curentul au în același moment variații în același sens și deci produsul lor este mereu pozitiv), însă de natură pulsatorie, ceea ce se repercutează defavorabil la cîrligul de tracțiune al locomotivei. Masa mare în rotație a motorului nivelează însă pulsațiile cuplului așa că, în mod practic, acest neajuns nu are o importanță mare.

3.3.3. **Comutația la motorul monofazat de tracțiune.** Fluxul inductor care străbate o spiră a motorului este:

$$\varphi = m \cdot i,$$

în care $i$ este curentul din rotor, iar $m$ — inductanța mutuală variabilă între inductor și spira rotorului.

Forța electromotoare indusă în spira rotorului va fi:

$$\varepsilon = -\frac{d\varphi}{dt} = -\frac{d(mi)}{dt} = -\left(i\frac{dm}{dt} + m\frac{di}{dt}\right),$$

adică ea se produce pe următoarele căi:

— prin variația inducției mutuale $\frac{dm}{dt}$, care rezultă din deplasarea spirei în raport cu fluxul inductor datorită mișcării de rotație, constituind forța electromotoare de rotație $\varepsilon_r$, denumită și dinamică;

— prin variația curentului comutat, acesta trecînd de la valoarea $+i/2$ la $-i/2$ și constituind forța electromotoare de selfinducție $\varepsilon_1$ (fig. 3.9);

— prin variația curentului inductor $\frac{di}{dt}$ datorită naturii sale alternative, constituind forța electromotoare statică $\varepsilon_s$.

În cazul motorului de curent continuu, curentul în inductor $i = \text{const.}$, $\frac{di}{dt} = 0$, și deci forța electromotoare indusă se reduce la cea de rotație $\varepsilon_r$ și la cea de selfinducție $\varepsilon_1$.

În cazul transformatorului $m = \text{const.}$, $\frac{dm}{dt} = 0$ (nu se rotește nimic) și forța electromotoare se reduce la cea statică $\varepsilon_s$.

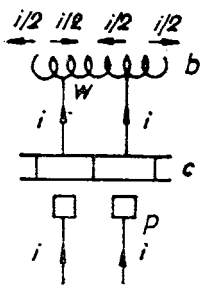



*Fig. 3.9.* Schema producerii tensiunii electromotoare de selfinducție: *b*—bobinajul indusului; *w*—spirele unei secții de comutație; *c* — lamelele colectorului *p* — serie.

În cazul motorului monofazat cu colector, variația fluxului într-o spiră a indusului este produsă atît prin mișcarea rotorului, cît și prin variația curentului inductor și deci forța electromotoare totală indusă este rezultatul suprapunerii celor trei forțe electromotoare $\varepsilon_r$, $\varepsilon_1$ și $\varepsilon_s$. Întrucît forța electromotoare statică se produce pe același principiu ca într-un transformator, ea se mai numește și forța electromotoare transformatorică $\varepsilon_{tr}$.

Forța electromotoare de rotație ca și cea de selfinducție este proporțională cu viteza de rotație și în fază cu fluxul inductor. Aceasta rezultă din:

$$\varepsilon_r = -i\frac{dm}{dt},$$

în care:

$$i = \sqrt{2}\cdot I\cdot \sin\omega\cdot t \text{ și } m = M\cdot\cos\alpha,$$

$$\frac{dm}{dt} = -M\sin\alpha\cdot\frac{d\alpha}{dt},$$

deci,

$$\varepsilon_r = \sqrt{2}\cdot M\cdot I\sin\alpha\cdot\frac{d\alpha}{dt}\cdot\sin\omega t.$$

Dar $\frac{d\alpha}{dt}$ este viteza unghiulară a rotorului mașinii, a cărui turație va fi:

$$n = k\frac{d\alpha}{dt}.$$

Pe de altă parte,

$$\varphi = \sqrt{2}L\cdot I\cdot\sin\omega\cdot t = \sqrt{2}\cdot\Phi\sin\omega t,$$

de unde

$$I = \frac{\Phi}{L}.$$

Forța electromotoare indusă într-o spiră, datorită rotației, devine:

$$\varepsilon_r = \sqrt{2}M\cdot\frac{\Phi}{L}\cdot\sin\alpha\cdot\frac{n}{k}\cdot\sin\omega t = k_1\cdot n\cdot\sin\omega t,$$

în care s-a notat

$$k_1 = \sqrt{2}\,\frac{M\cdot\sin\alpha}{L\cdot k} = \text{const.}$$

În această expresie valoarea unghiului $\alpha$ a fost luată constantă, deoarece s-a considerat o anumită poziție din spațiu prin care trec succesiv toate spirele.

Se vede așadar că forța electromotoare de rotație este proporțională cu turația $n$ și în fază cu fluxul $\varphi$.

Forța electromotoare transformatorică este independentă de turația $n$, însă proporțională cu frecvența $f$ și decalată cu $\pi/2$ în urma fluxului $\varphi$.

Aceasta rezultă din:

$$\varepsilon_{tr} = -m\frac{di}{dt} = -M\cdot\cos\alpha\frac{d}{dt}[\sqrt{2}\cdot I\sin\omega t] =$$

$$= -\sqrt{2}\cdot M\cdot I\cdot\cos\alpha\cdot\omega\cdot\cos\omega t,$$

în care, dacă se înlocuiește

$$I = \frac{\Phi}{L};\ \omega = 2\cdot\pi\cdot f;\ -\cos\omega t = \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right),$$

se găsește

$$\varepsilon_{tr} = \sqrt{2}\cdot M\frac{\Phi}{L}\cdot\cos\alpha\cdot 2\cdot\pi f\cdot\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = k_2\cdot f\cdot\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

în care:

$$k_2 = 2\cdot\sqrt{2}\cdot\frac{M\cos\alpha}{L}.$$

Așadar, forțele electromotoare $\varepsilon_r$ și $\varepsilon_1$ se adună algebric și dau, în secția cu $\omega_s$ spire intrate în comutație, forța electromotoare indusă $e_d$, în fază cu fluxul și cu intensitatea, care are expresia:

$$e_d = k\cdot n\cdot\Phi\cdot w_s\,[V].$$

Forța electromotoare statică, într-o secție cu $w_s$ spire intrate în comutație, are expresia:

$$e_{tr} = 2\cdot\pi f\cdot\Phi\cdot w_s\,[V].$$

În aceste relații $\Phi$ este fluxul eficace pe pol, în Wb.

Forța electromotoare totală $e$ indusă în secția de comutație este suma geometrică a forțelor electromotoare $e_d$ și $e_{tr}$, (fig. 3.10).

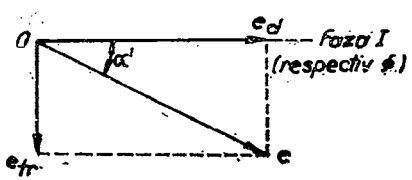



*Fig. 3.10.* Diagrama tensiunilor induse în secția de comutație.

Agravarea comutației la motorul monofazat se datorește prezenței forței electromotoare transformatorice, iar dificultățile compensării ei provin din faptul că nu depinde de rotația motorului și este decalată cu $\pi/2$ în urma fluxului.

Tehnica realizării motorului monofazat de tracțiune este dictată de măsurile pentru reducerea valorii forței electromotoare transformatorice și compensarea acesteia.

Măsurile și soluțiile care au condus la această tehnică sînt următoarele:

— utilizarea unei frecvențe joase, alegîndu-se $f = 16\ 2/3$ Hz; aceasta este de altminteri rațiunea, apariției și a dezvoltării sistemului de tracțiune electrică feroviară în curent monofazat și frecvență 16 2/3 Hz;

— limitarea fluxului pe pol $\Phi$ pentru o frecvență dată, însă menținînd fluxul total al mașinii, ceea ce implică realizarea motorului cu un număr mare de poli (14 și chiar mai mult la motoarele de mare putere);

— limitarea forței electromotoare transformatorice necompensată la valori mici, ceea ce impune și limitarea tensiunii maxime aplicate motorului; s-a ajuns la 400 ··· 500 V comparativ cu 1 500 V cît se admite în cazul curentului continuu;

— micșorarea numărului de spire $w_s$ al secției de comutație, ceea ce conduce la un număr mare de lamele la colectorul motorului și implicit la dimensiuni mari ale acestuia;

— compensarea forței electromotoare transformatorice.

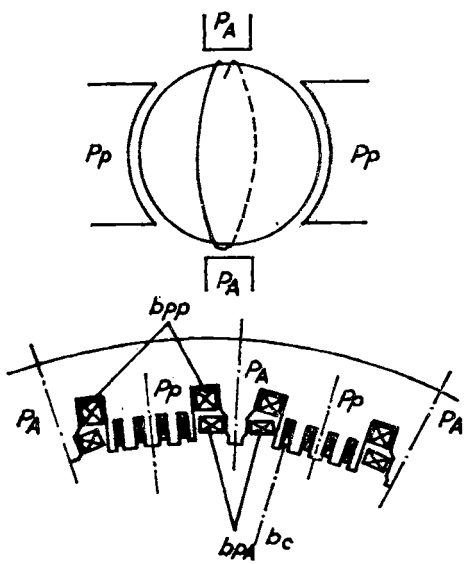



*Fig. 3.11.* Schema înfășurărilor motorului monofazat: $P_p$ — poli principali; $P_A$ — poli auxiliari; $b_{pp}$ — înfășurarea polilor principali; $b_{PA}$ — înfășurarea polilor auxiliari; $b_c$ — înfășurarea de compensație.

Procedeul utilizat pentru compensarea forței electromotoare totale indusă în secția de comutație, cunoscut sub denumirea de *metoda Behn-Eschenburg*, constă în șuntarea polului auxiliar (polul de comutație) pe o rezistență ohmică.

În acest scop, în afară de înfășurarea de compensație, se prevede motorul cu poli auxiliari, dealtfel ca și la motorul de curent continuu, a căror axă este plasată în planul secției, de comutație, ca în schema din figura 3.11.

Prin polii auxiliari, în secția de comutație se creează local o tensiune electromotoare de corecție, de natură pur dinamică, întrucît ea se naște prin deplasarea spirei în cîmpul creat de polul auxiliar și nu de forma alternativă a curentului care excită polul auxiliar. Această forță electromotoare de corecție servește la compensarea forței electromotoare induse (*e*, în fig. 3.10), însă trebuie defazat convenabil curentul de excitație al polilor auxiliari, față de curentul ce trece prin motor, lucru ce se obține cu o rezis-

tență ohmică montată în derivație pe înfășurarea polului auxiliar, ca în schema din figura 3.12.

Descompunînd curentul $I_{PA}$ în cele două componente $I_d$ în fază cu $I$ și $I_t$ în cuadratură, se obține diagrama din figura 3.13, asemănătoare cu diagrama forțelor electromotoare de comutație din figura 3.10.

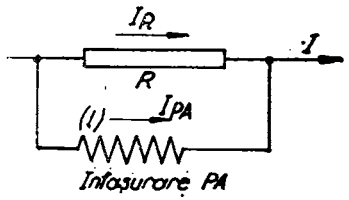



*Fig. 3.12.* Schema șuntării polului auxiliar cu o rezistență.

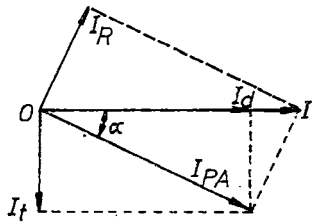



*Fig. 3.13.* Diagrama vectorială a curentului din polul auxiliar.

Întrucît $\bar{I} = \bar{I}_R + \bar{I}_{PA}$ și $\operatorname{tg} \alpha = \frac{\omega l}{R}$, o compensare totală are loc dimensionînd corespunzător polul de comutație $l$ și rezistența $R$, astfel ca $\alpha = \alpha'$ și forța electromotoare creată în secția de comutație sub efectul lui $I_{PA}$ să fie egală și opusă lui $e$ (vezi și fig. 3.10).

Amperspirele componentei $I_d$ induc în secția de comutație o forță electromotoare ce va compensa pe $e_d$, iar cele ale componentei $I_t$ induc o forță electromotoare ce va compensa pe $e_{tr}$.

Trebuie observat însă că forțele electromotoare de corecție datorite lui $I_d$ și $I_t$ sînt proporționale cu turația și sînt de natură pur dinamică, ceea ce conduce la compensarea totală a forței electromotoare $e_d$ la toate regimurile de turație, întrucît și aceasta depinde de turație, iar compensarea lui $e_{tr}$ se produce numai la turația de referință aleasă, în afara acestei turații compensarea fiind imperfectă.

La demaraj, acțiunea polilor auxiliari este inexistentă, iar $e_{tr}$ are o valoare cu atît mai mare, cu cît intensitatea este mai ridicată, ceea ce recomandă trecerea rapidă peste perioada de demaraj și evitarea funcționării motorului timp îndelungat la regimul vitezelor joase.

Pentru o valoare reziduală a forței electromotoare transformatorice $e_{tr} = 2{,}5 \ldots 3$ V, pe baza tehnicii expuse sînt realizate motoare de tracțiune monofazate tip serie pentru frecvența de 16 2/3 Hz cu funcționare corespunzătoare în exploatare.

## 3.4. SERVICIILE AUXILIARE

Serviciile auxiliare, ca și destinația acestora, sînt aceleași ca la locomotivele de curent continuu. Soluția cea mai simplă, care de altminteri se și aplică, este de a folosi motoare monofazate directe, ca și motoarele de trac-

țiune, realizate la cea mai convenabilă tensiune. Priza de tensiune pentru alimentarea motoarelor serviciilor auxiliare se ia, bineînțeles, de la secundarul transformatorului principal (vezi fig. 3.5).

Circuitele de comandă, ca și serviciile proprii ale locomotivei (iluminat, ștergătoare de parbriz, încălzirea cabinelor mecanicului) se realizează, de regulă, în curent continuu la joasă tensiune, care se obține printr-un grup de redresare $t—R$.

În tampon cu grupul de redresare lucrează o baterie de acumulatoare *BA*, care alimentează serviciile proprii, cînd locomotiva staționează.

## Capitolul 4

# LOCOMOTIVE ELECTRICE DE CURENT MONOFAZAT ȘI FRECVENȚĂ INDUSTRIALĂ, DE TIP EXPERIMENTAL

### 4.1. GENERALITĂȚI

La căile ferate electrificate în curent alternativ monofazat și frecvență industrială există în exploatare, în ordinea apariției, următoarele tipuri de locomotive electrice:

— locomotiva mono-trifazată, la care convertirea curentului monofazat de la linia de contact în curent trifazat se face folosind un agregat rotativ, iar motoarele de tracțiune sînt motoare asincrone trifazate normale;

— locomotiva mono-continuă cu grup convertizor rotativ, la care convertirea curentului monofazat în curent continuu se face folosind un grup motor sincron (sau asincron)-generator de curent continuu, iar motoarele de tracțiune sînt motoare serie de curent continuu;

— locomotiva monofazată cu motoare monofazate tip serie, directe la 50 Hz;

— locomotiva mono-continuă cu agregat convertizor de tip static, fie cu redresoare monoanodice de tip ignitron sau excitron, fie cu redresoare semiconductoare siliciu.

Primele trei tipuri au apărut în faza de cercetări-încercări și sînt considerate tipuri experimentale, ultimul tip este locomotiva astăzi generalizată.

Principiul de bază al locomotivei mono-trifazate constă în transformarea pe locomotivă a curentului monofazat 50 Hz de la linia de contact în curent alternativ trifazat de tensiune convenabilă și folosirea de motoare asincrone trifazate pentru tracțiune.

Folosirea motorului asincron trifazat pentru tracțiune, datorită lipsei colectorului și deci a problemei comutației, simplității constructive și robusteței în exploatare, la prima vedere, pare interesantă și avantajoasă.

Se știe însă că turația motorului asincron variază în limite foarte strînse cu sarcina, fiind dictată de alunecare care este foarte mică:

$$n = (1 - a)\frac{\omega}{p} \text{ rad/s},$$

sau

$$n = (1 - a)\frac{f}{p} \text{ rot/s},$$

în care:

$2p$ este numărul de poli ai motorului;

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$—pulsația curentului de alimentare;

$f$ — frecvența curentului de alimentare;

$a$ — alunecarea.

Turația motorului, respectiv viteza locomotivei, depinde de doi parametri: numărul de poli $2p$ și frecvența curentului $f$, de unde rezultă dificultăți în privința reglajului vitezei, care se poate obține în două moduri:

— prin schimbarea numărului de poli, folosind motor asincron trifazat cu poli comutabili, în care caz reglajul este discontinuu;

— prin variația frecvenței, folosind un convertizor de frecvență, variație care se poate face fie discontinuu, fie continuu în funcție de schema adoptată.

Pentru ilustrarea principiului și a problemelor esențiale, se vor prezenta două variante de locomotivă construite și aflate în exploatare: locomotiva $B_0$—$C_0$ tip Ganz-Kando a căilor ferate ungare (M.A.V.) și locomotiva $C_0$—$C_0$ seria 14 000 a căilor ferate franceze (S.N.C.F.).

## 4.2. LOCOMOTIVA MONO-TRIFAZATĂ GANZ-KANDO

În Republica Populară Ungară, linia Budapesta—Hegyeshalom în lungime de 190 km a fost electrificată încă din anul 1932 în curent monofazat 50 Hz, R.P.U. fiind considerată ca pionier al acestui sistem de electrificare. Locomotivele folosite sînt realizate după concepția originală și interesantă a inginerului ungar *Kelemen Kando*. Ultimul tip de locomotivă realizat în 1950 de uzinele Ganz din Budapesta, prezintă următorii parametrii constructivi:

— curentul și tensiunea de alimentare . . . . . curent alternativ monofazat 50 Hz și 16kV;

— formula osiilor . . . . . $B'_0 - C'_0$;

— lungimea totală . . . . . 14 600 mm;

— greutatea totală și aderentă . . . . . 85 t;

— trepte rigide de viteză . . . . . 25; 50; 75; 100; 125 km/h;

— forța de tracțiune la obadă, la demaraj . . . 21 t;

— forța de tracțiune uniorară, corespunzătoare treptelor de viteză respectivă . . . . . 13,5; 13,5; 10,8; 8,6; 6,9 t;

— puterea uniorară, corespunzătoare treptelor de viteză respectivă . . . . . 1250; 2500; 3000; 3200; 3200 CP.

Schema electrică de principiu a circuitului principal de forță este reprezentată în figura 4.1.

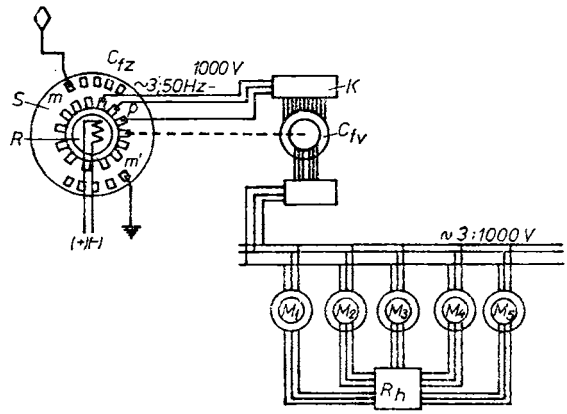



*Fig. 4.1.* Schema circuitului principal de forță al locomotivei mono-trifazată Ganz-Kando: $C_{fz}$ — convertizor de fază; $K$ — comutator; $C_{fv}$ — convertizor de frecvență; $M$... — motoare de tracțiune; $R_h$ — reostat rotoric cu lichid.

4.2.1. **Convertizorul de fază.** Este realizat ca o mașină sincronă, al cărui principiu de funcționare este prezentat în cele ce urmează.

Dacă se alimentează statorul unei mașini sincrone sau asincrone în curent monofazat de pulsație $\omega = 2\pi \cdot f$, cîmpul alternativ statoric care se produce poate fi descompus în două cîmpuri învîrtitoare cu amplitudine pe jumătate și de sensuri contrare, care se rotesc respectiv cu vitezele $\frac{\omega}{p}$ și $-\frac{\omega}{p}$, unde:

$2p$ este numărul de poli ai înfășurării statorice;
$\omega$ — pulsația curentului de alimentare;
$f$ — frecvența curentului de alimentare;
$\omega/p$ — viteza în rad/s (sau $f/p$, în rot/s).

Rotorul mașinii, excitat în curent continuu, se va prinde pe unul din cîmpurile învîrtitoare, denumit cîmp direct și se va roti față de cîmpul invers cu viteza $\frac{2\omega}{p}$.

Cîmpul învîrtitor direct va induce în rotor (părțile lui masive sau colivia amortizoare) curenți care se opun variațiilor cîmpului invers și au drept efect înăbușirea acestuia. În mod practic va rămîne numai cîmpul învîrtitor direct.

Dacă pe stator se dispune o înfășurare trifazată, aceasta va fi tăiată de cîmpul învîrtitor direct și va fi sediul unei forțe electromotoare trifazate, ca într-un alternator; mașina este capabilă să furnizeze un curent trifazat de aceeași frecvență ca și curentul monofazat de alimentare, indiferent de numărul de poli ai convertizorului.

Pe statorul convertizorului de fază $S$ (fig. 4.1) sînt plasate două înfășurări: una monofazată în crestăturile periferice $m$ alimentată în curent monofazat 50 Hz, 16 kV și alta trifazată în crestăturile $p$ din imediata apropiere a întrefierului în care se induce și de la care se livrează curent alternativ trifazat 50 Hz, 1 000 V.

În afară de convertirea curentului, din monofazat în trifazat, convertizorul de fază joacă rolul și de transformator coborîtor de tensiune, de la 16 kV la 1 000 V, care este tensiunea de alimentare a motoarelor de tracțiune.

Din punct de vedere constructiv, convertizorul de fază este realizat într-un mod puțin obișnuit la mașinile electrice. Statorul este răcit cu ulei, în care scop este prevăzut cu o pompă de circulație și un răcitor cu ventilator iar rotorul este răcit cu apă și, de asemenea, prevăzut cu pompă de circulație, și răcitor cu ventilator. Sistemul de răcire al convertizorului conduce la micșorarea dimensiunilor gabaritice și inclusiv a greutății, lucru necesar întrucît el trebuie dimensionat la întreaga putere a locomotivei.

4.2.2. **Convertizorul de frecvență.** Este realizat ca un motor asincron normal cu inele, al cărui principiu de funcționare rezultă din figura 4.2.

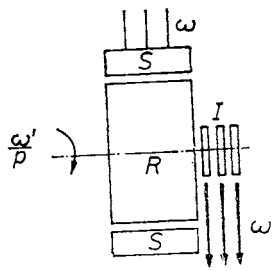



*Fig. 4.2.* Schema convertizorului de frecvență : $S$ — stator; $R$ — rotor; $I$ — inele.

Dacă se alimentează statorul în curent trifazat de pulsație $\omega = 2\pi \cdot f$, se va naște un cîmp învîrtitor statoric de viteză $\omega/p$.

Presupunînd că rotorul este rotit cu o viteză unghiulară diferită $\omega'/p$, curenții induși în înfășurările rotorului vor avea o pulsație care depinde de viteza relativă a rotorului în raport cu viteza cîmpului învîrtitor statoric.

La bornele rotorului se vor culege curenți de pulsație

$$\omega_2 = \omega - \omega' = a \cdot \omega,$$

în care $a$ este alunecarea.

Cînd rotorul se învîrtește în același sens cu cîmpul învîrtitor statoric se va obține în valoare absolută:

$$\omega_2 = \omega - \omega'.$$

Cînd rotorul se învîrtește în sens invers față de cîmpul învîrtitor statoric $\left(\frac{\omega'}{p} \text{ negativ}\right)$ se va obține în valoare absolută.

$$\omega_2 = \omega + |\omega'|.$$

Pentru a varia pulsația $\omega_2$ se poate acționa asupra vitezei rotorului $\frac{\omega'}{p}$ în mod continuu sau discontinuu sau, menținînd viteza rotorului constantă se poate acționa asupra vitezei unghiulare $\frac{\omega}{p}$ a cîmpului învîrtitor, prin schimbarea numărului de poli ai mașinii-mașină cu poli comutabili — adică printr-o variație discontinuă.

În cazul locomotivei Ganz-Kando, convertizorul de frecvență este pe același ax cu convertizorul de fază, care fiind realizat cu patru poli, deci $n_s = \frac{60\,f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1\,500$ rot/min, turația de antrenare a rotorului convertizorului de frecvență va fi constantă, de 1 500 rot/min.

De la inelele convertizorului de frecvență se alimentează motoarele de tracțiune sub tensiunea constantă de 1 000 V și frecvență variabilă, ce se obține prin comutarea polilor convertizorului de frecvență, realizat cu polii comutabili (doi, patru și șase poli). Frecvențele obținute sînt de valoare fixă și deci variația este discontinuă.

Valoarea frecvenței curentului ce se culege la inelele convertizorului de frecvență $f_2$ și cu care se alimentează motoarele de tracțiune este dată de relația:

$$f_2 = f_1 \frac{n_s - n}{n_s}, \tag{1}$$

în care:

$f_1$ este frecvența curentului de alimentare a statorului convertizorului de frecvență ($f_1 = 50$ Hz = const.);

$n_s$ — turația de sincronism a cîmpului învîrtitor statoric al convertizorului de frecvență, variabilă după numărul de poli ai acestuia;

$n$ — turația de antrenare a rotorului convertizorului de frecvență ($n = 1\,500$ rot/min = const.).

Cele două mașini rotative, convertizorul de fază și frecvență cuplate axial, datorită ancombramentului și greutății lor mari, au impus boghiul cu trei osii ($C_0$). Programul de remorcare și profilul liniei neimpunînd o aderență justificată pe șase osii motoare, celălalt boghiu al locomotivei s-a adoptat cu două osii ($B_0$). De aici a rezultat și formula osiilor $B_0$—$C_0$, neobișnuită în construcția locomotivelor electrice.

4.2.3. **Motorul de tracțiune.** Așa cum s-a menționat, motorul instalat pe locomotivă pentru tracțiune este asincron trifazat cu inele. De la teoria motorului asincron se știe că expresia cuplului este de forma

$$C = \frac{A \cdot R \cdot a}{R^2 + B^2 \cdot a^2}, \tag{2}$$

în care:

$A$, $B$ reprezintă constante de proporționalitate;

$R$ — rezistența pe fază a rotorului;

$a = \frac{n_s - n}{n_s}$ — alunecarea.

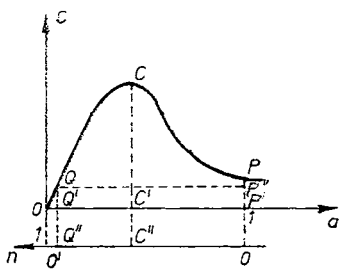



*Fig. 4.3.* Caracteristica cuplului motorului asincron.

Curba cuplului în funcție de alunecarea $a$ sau de turația motorului $n$ are forma din figura 4.3.

La pornire, cînd $n = 0$, respectiv $a = 1$, valoarea cuplului este:

$$C_p = \frac{A \cdot R}{R^2 + B^2} = \overline{p \cdot p'}.$$

Dacă cuplul rezistent este mai mic decît $\overline{pp'}$, de exemplu $\overline{p'p''}$, motorul pornește și funcționarea sa stabilește în punctul $Q$ cu o alunecare $a = \overline{OQ'}$ sau cu o turație $n = \overline{O'Q''}$ apropiată de cea de sincronism. Pe măsură ce

cuplul rezistent crește, punctul de funcționare $Q$ se deplasează spre $M$, iar valoarea cuplului maxim

$$C_{max} = \frac{A}{2B} = \overline{MM'}$$

se obține din relația (2) pentru $\frac{dC}{da} = 0$.

Funcționarea motorului se face în mod stabil numai pe ramura ascendentă $OM$ care, fiind rapid crescătoare, înseamnă că turația motorului asincron variază în limite foarte mici cu sarcina; practic se consideră $n = \text{const.}$

Pentru respectarea condiției cerute în tracțiune, ca la demaraj cuplul să fie maxim (deplasarea punctului $P$ în $M$) și cum din relația cuplului se observă că acesta depinde de valoarea rezistenței pe fază a rotorului, se utilizează motorul cu inele și un reostat rotoric care dă posibilitatea variației rezistenței pe fază a rotorului, ca în diagrama din figura 4.4.

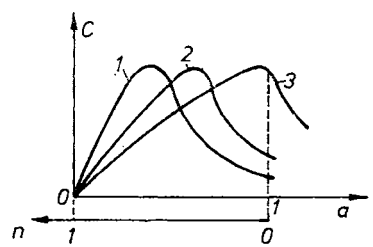



*Fig. 4.4.* Caracteristicile cuplului motorului asincron, cu reostat rotoric: *1* — fără reostat; *2*, *3*, ... — cu trepte de reostat rotoric.

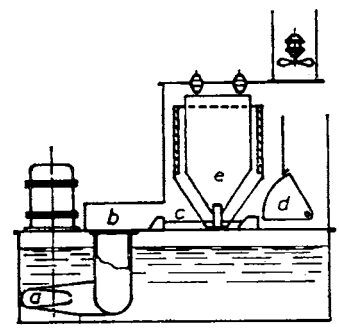



*Fig. 4.5.* Dispoziția schematică a reostatului rotoric cu lichid: *a* — pompă de circulație; *b* — cameră de refulare; *c* — camera electrozilor; *d* — vană; *e* — electrozi.

Locomotiva Ganz-Kando dispunînd de cinci motoare de tracțiune, pe ea se folosește un reostat rotoric cu lichid construit cu 15 electrozi, cîte trei electrozi de fiecare motor, a cărui dispoziție constructivă este prezentată în figura 4.5.

4.2.4. **Variația vitezei locomotivei.** Aceasta este dictată, evident, de posibilitățile de variație a turației motoarelor de tracțiune. În cazul locomotivei în chestiune, variația vitezei se obține prin variația discontinuă a frecvenței curentului de alimentare a motoarelor de tracțiune, în felul următor:

— Se realizează conexiunea bipolară a convertizorului de frecvență, pentru care viteza de sincronism a cîmpului învîrtitor statoric va fi:

$$n_s = \frac{60f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{1} = 3000 \text{ rot/min.}$$

Sensul cîmpului învîrtitor statoric se menține același cu sensul de rotație al rotorului.

Rezultă, conform relației (1), o frecvență de alimentare a motoarelor:

$$f_2 = f_1 \frac{n_s - n}{n_s} = 50 \frac{3000 - 1500}{3000} = 25 \text{ Hz.}$$

— Curentul trifazat 50 Hz este furnizat motoarelor de tracțiune direct de la convertizorul de fază; nu se mai trece prin convertizorul de frecvență. Pentru această situație

$$f_2 = 50 \text{ Hz.}$$

— Convertizorul de frecvență se menține tot în conexiune bipolară ($n_s = 3000$ rot/min), însă se inversează sensul cîmpului învîrtitor statoric față de rotirea rotorului. Rezultă:

$$f_2 = 50 \frac{-3\,000 - 1500}{-3000} = 75 \text{ Hz.}$$

— Convertizorul de frecvență se conectează tetrapolar $\left(n_s = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1\,500 \text{ rot/min}\right)$ și sensul cîmpului învîrtitor statoric se menține inversat față de sensul de rotire al rotorului.

Pentru această situație, valoarea frecvenței devine:

$$f_2 = 50 \frac{-1500 - 1500}{-1500} = 100 \text{ Hz.}$$

— Convertizorul de frecvență se conectează hexapolar $\left(n_s = \frac{60 \cdot 50}{3} = 1\,000 \text{ rot/min}\right)$ cu menținerea sensului cîmpului învîrtitor statoric inversat:

$$f_2 = 50 \frac{-1000 - 1500}{-1000} = 125 \text{ Hz.}$$

În acest mod se obțin cinci valori precise ale frecvențelor $f_2$ ale curentului de alimentare pentru motoarele de tracțiune: 25; 50; 75; 100; 125 Hz. Raportul de transmisie al angrenajului dintre motor și osie este astfel determinat, încît pentru o valoare în Hz a frecvenței să rezulte aceeași valoare în km/h a vitezei locomotivei, așa că locomotiva are cinci trepte de viteză bine definite: 25; 50; 75; 100; 125 km/h. Bineînțeles, trecerea de la o viteză la alta nu se poate face instantaneu; în perioadele de tranziție, pînă la stabilizarea treptei de viteză următoare intră în funcțiune tot reostatul rotoric cu lichid

la care sînt conectate inelele motoarelor de tracțiune (se variază rezistența pe fază a rotorului motorului).

Aceste trepte de viteză, respectiv caracteristici de tracțiune, puține la număr și rigide, conduc la o elasticitate prea mică în exploatare.

4.2.5. **Frînarea electrică.** Din examinarea expresiei cuplului motorului asincron

$$C = \frac{A.R. \frac{n_s - n}{n_s}}{R^2 + B^2 \left( \frac{n_s - n}{n_s} \right)^2},$$

se observă, că, atunci cînd viteza locomotivei conduce la o turație a motorului $n > n_s$, cuplul devine negativ, iar motorul trece automat la funcționarea în regim de generator asincron, și deci recuperează. Fără a prevedea aparataj sau utilaj suplimentar, locomotiva dispune de frîna recuperativă în mod automat prin însăși schema ei funcțională. Indiferent de valoarea cuplului rezistent de tracțiune, locomotiva Kando își menține automat viteza de circulație corespunzătoare valorii frecvenței curentului de alimentare a motoarelor.

4.2.6. **Concluzii asupra locomotivei Ganz-Kando.** Partea mecanică propriu-zisă și aparatajul uzual nu prezintă particularități deosebite față de soluțiile clasice adoptate la locomotivele electrice.

În privința conducerii locomotivei, este de menționat că punerea ei în funcțiune se face ceva mai dificil ca la tipurile uzuale, din cauza operațiunii de lansare a convertizorului de fază care necesită 2—3 min. La trecerea locomotivei sub zonele neutrale, unde se schimbă fazele de alimentare a liniei de contact, mecanicul este obligat la manevre suplimentare pentru resincronizarea convertizorului de fază.

Convertizorul de fază este o mașină complicată și împreună cu convertizorul de frecvență prezintă mase apreciabile în mișcare de rotație care trebuie translatate cu viteza locomotivei, soluție în general incomodă în exploatarea locomotivelor.

Posibilitățile de remorcare sînt limitate, locomotiva pretîndu-se pentru serviciul trenurilor de tonaj redus pe linii cu profil ușor, cum este cazul liniei Budapesta-Hegyeshalom, unde se aplică și unde declivitatea maximă a traseului nu depășește $6^0/_{00}$.

Cu toate avantajele ce le oferă — motorul de tracțiune robust, funcționarea convertizorului de fază la $\cos \varphi = 1$, ceea ce antrenează căderi de tensiune reduse în linia de contact, frînare recuperativă automată — datorită dezavantajelor majore menționate, această soluție de schemă electrică nu și-a mai găsit aplicare la altă administrație de cale ferată. În ultima vreme, chiar R.P.U. a renunțat la construcția locomotivei de acest tip și s-a trecut la locomotive de tipul mono-continuu cu redresoare.

## 4.3. LOCOMOTIVA MONO-TRIFAZATĂ CU REGLAREA CONTINUĂ A FRECVENȚEI

Particularitatea acestei locomotive, comparativ cu soluția Ganz-Kando, constă în aceea că variația frecvenței curentului de alimentare a motoarelor de tracțiune nu se face discontinuu, ci în mod progresiv începînd de la o valoare redusă.

Reglajul vitezei se face în întregime în interiorul grupurilor convertizoare de fază și frecvență, motoarele de tracțiune sînt în colivie (nu cu inele) și deci reostatul rotoric nu mai este necesar.

4.3.1. **Schema electrică și principiul de funcționare.** Schema electrică de principiu este reprezentată în figura 4.6 (această schemă corespunde locomotivei $C_0$—$C_0$ seria 14000 a căilor ferate franceze).

Convertizorul de fază este o mașină sincronă mono-trifazată de la care se alimentează convertizorul de frecvență care este o mașină asincronă trifazată cu inele; alimentarea acesteia se face prin inele și nu prin stator. Convertizorul de frecvență alimentează, din stator, motoarele de tracțiune în curent alternativ trifazat cu frecvență variabilă, în mod continuu.

Motoarele de tracțiune sînt mașini de inducție trifazate asincrone normale în colivie.

Pentru fiecare treaptă a controlerului de comandă, motoarele de tracțiune sînt alimentate la tensiunea $\frac{U}{f} = \text{const.}$

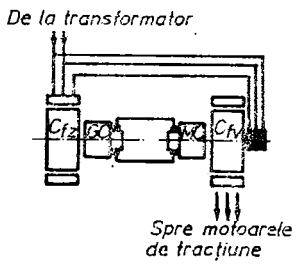



*Fig. 4.6.* Principiul constructiv al locomotivei mono-trifazată Co —Co 14 000 (SNCF): $C_{fz}$ — convertizor de fază; $C_{fv}$ — convertizor de frecvență; *GC*, *MC* — generator și motor de curent continuu (grup Ward-Leonard).

La demaraj, locomotiva funcționează pe partea stabilă a caracteristicilor $C = f(n)$ corespunzătoare frecvențelor joase și deci nu este necesar să se recurgă la reostat rotoric.

4.3.2. **Reglarea vitezei.** Pentru realizarea frecvenței variabile, antrenarea convertizorului de frecvență cu turație variabilă se face prin *sistem Ward-Leonard*, în care scop, pe axul convertizorului de fază, este cuplat un generator de curent continuu *GC*, iar pe axul convertizorului de frecvență un motor de antrenare de curent continuu *MC* alimentat de generator.

Generatorul de curent continuu este antrenat la turație riguros constantă, turația de sincronism a convertizorului de fază.

Acționînd asupra excitațiilor mașinilor de curent continuu *GC* și *MC* se obține modificarea turației de antrenare a convertizorului de frecvență și în consecință variația continuă a frecvenței. În cazul concret al locomotivei $C_0$—$C_0$ 14000 nu se adoptă această soluție de reglare, adică nu se pune la dispoziția mecanicului un reostat de excitație pe *grupul Ward-Leonard*, prin care să se dea motorului *MC* o turație bine determinată și deci o frecvență corespunzătoare la motoarele de tracțiune, frecvență care determină în final viteza locomotivei, întrucît acest sistem de reglare prezintă următoarele inconveniente:

— locomotiva aflîndu-se în mers pe o anume treaptă de controler trecerea controlerului pe o treaptă inferioară în scopul micșorării vitezei, are drept efect trecerea punctului de funcționare $A$ de pe caracteristica $M$ în $A'$ pe caracteristica $M'$ ceea ce echivalează cu o frînare dură (figura 4.7).

— Dacă locomotiva se află în mers, iar controlerul este adus la zero și se dorește să se restabilească apoi forța de tracțiune (trecerea rapidă de la poziția zero la alta corespunzătoare vitezei respective), ar trebui mai întîi pentru aceasta, să se aducă convertizorul de frecvență la turația corespunzătoare turației motoarelor de tracțiune ceea ce complică mult aparatajul.

Pentru eliminarea acestor inconveniente sistemul de reglare adoptat nu se bazează pe principiul de mai sus, adică fiecărei poziții a controlerului să-i corespundă o turație determinată a convertizorului de frecvență, ci un cuplu determinat al motoarelor de tracțiune, cuplul sensibil constant și independent de viteză. Adoptînd ca parametru de reglare cuplul motorului de tracțiune, viteza trenului se va adapta la noua forță motoare ținînd seama de tonaj și profil, frecvența curentului în motoare va urma viteza de rotație și turația convertizorului de frecvență se va adapta singură.

Impunerea unui cuplu motoarelor de tracțiune revine la a impune un cuplu pe arborele convertizorului de frecvență, adică motorului de curent continuu $MC$ care îl antrenează.

Dacă pentru o treaptă a controlerului excitația motorului de curent continuu este constantă, cuplul motorului este determinat de valoarea curentului din circuitul *Ward-Leonard*, independentă de turație, adică independentă de tensiunea $U$ aplicată lui $MC$ de către $GC$. În acest mod se substituie reglarea tensiunii $U$ a generatorului $GC$ cu reglarea curentului $I$, oricare ar fi tensiunea $U$. Acest lucru se realizează adoptînd pentru mașinile de curent continuu sistemul de excitație ca în schema din figura 4.8.

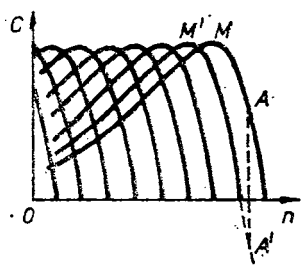



*Fig. 4.7.* Caracteristicile cuplului motorului asincron pentru diverse frecvențe ale curentului.

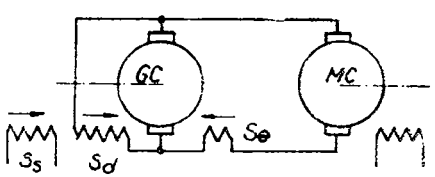



*Fig. 4.8.* Schema sistemului de excitație a grupului Ward-Leonard.

Generatorul de curent continuu este realizat cu trei înfășurări: o înfășurare separată $S_s$ sub dependența controlerului, o înfășurare serie antagonistă $S_e$ și o înfășurare derivație $S_d$.

Motorul de curent continuu este realizat cu înfășurare de excitație separată, alimentată de o excitatrice cu trei înfășurări.

Craacteristicile de tracțiune corespunzătoare diferitelor poziții ale controlerului de comandă au aspect sensibil orizontal într-o gamă largă de viteze, ca în figura 4.9.

4.3.3. **Frînarea electrică.** Schema electrică a locomotivei este reversibilă, fără a fi necesar aparataj sau echipament suplimentar. Prin inversarea numai a curentului din înfășurarea de excitație separată a generatorului de curent continuu, curentul din circuitul *Ward-Leonard* se inversează și locomotiva trece în regim de frînă recuperativă, prezentînd caracteristicile de frînare ca în figura 4.9.

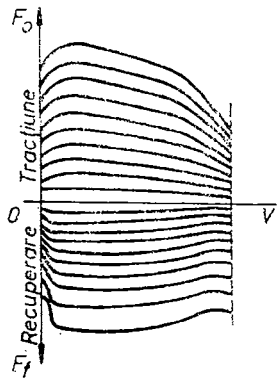


*Fig. 4.9.* Caracteristicile de tracțiune și frînare recuperativă.

4.3.4. **Concluzii.** Din punct de vedere constructiv locomotiva comportă mașini rotative de construcție clasică.

Fiecare grup convertizor necesitînd cîte două mașini rotative, locomotiva este grea și cu randament scăzut ($\eta = 0{,}75 \ldots 0{,}80$), iar întreținerea este scumpă.

Masele mari în mișcare de rotație reprezintă o soluție nedorită pentru o locomotivă, mai ales în cazul locomotivelor de viteză mare.

Nu constituie o soluție de locomotivă universală din cauza greutății mari și a vitezei maxime constructive reduse, fiind potrivită numai pentru serviciul trenurilor de marfă.

Datorită acestor considerente și această formulă de locomotivă, ca și cea Ganz-Kando, nu s-a extins, ci s-a limitat la cîteva exemplare experimentale.

## 4.4. LOCOMOTIVA MONO-CONTINUĂ CU GRUPURI CONVERTIZOARE ROTATIVE

4.4.1. **Principiul constructiv și de funcționare.** O locomotivă electrică de acest tip este realizată pe baza principiului schemei din figura 4.10.

Pe locomotivă se instalează un transformator monofazat coborîtor de tensiune, cu raport de transformare fix, de la care se alimentează un motor sincron monofazat. Motorul antrenează axial un generator de curent continuu cu turație constantă. De la bornele generatorului se alimentează motoarele de tracțiune serie de curent continuu. Tensiunea la bornele motoarelor de tracțiune se reglează ușor, după voință și în mod continuu de la zero la tensiunea maximă prin acționare asupra sistemului de excitație a generatorului. În această soluție nu mai este necesar reostatul de pornire în circuitul motoarelor de tracțiune; acestea pot fi conectate în permanență în paralel pe bornele generatorului, iar caracteristicile de tracțiune apar ca o familie de curbe.

Asupra alegerii motorului de antrenare sincron, se precizează că se preferă motorul sincron din cauza marelui avantaj de a oferi un factor de putere

egal cu 1, printr-un reglaj convenabil al excitației, ceea ce atenuează căderile de tensiune în linia de contact.

În linii mari, locomotiva diesel-electrică este realizată pe același principiu,

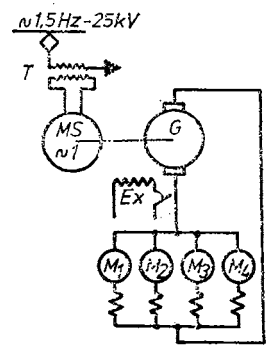



*Fig. 4.10.* Schema de principiu a unei locomotive mono-continuu cu grupuri convertizoare rotative: *T* — transformator monofazat; *MS* — motor sincron monofazat; *G* — generator de curent continuu; *M* — motoare de curent continuu serie.

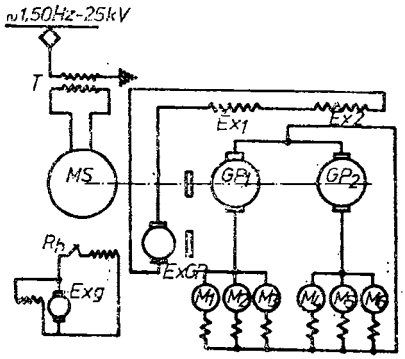



*Fig. 4.11.* Schema de principiu a locomotivei $C_0 - C_0$ seria 14 100 (SNCF): $GP_1$, $GP_2$ — generatoare de tracțiune Ex.*GP* — excitatricea generatoarelor; $E_{x \cdot g}$ — excitatricea excitatricei $E_{x \cdot GP}$.

cu deosebirea că elementul principal de forță îl constituie motorul diesel cu echipamentul său auxiliar, iar în cazul locomotivei electrice de acest tip, mașina diesel este înlocuită prin transformatorul și motorul sincron.

La căile ferate electrificate în curent monofazat 50 Hz, 25 kV există în exploatare locomotive de tipul mono-continuu cu grupuri convertizoare rotative. Pentru exemplificare, se prezintă locomotiva $C_0 - C_0$ seria 14100 a căilor ferate franceze, realizată în 100 de exemplare.

4.4.2. **Locomotiva $C_0 - C_0$ seria 14100 cu grupuri convertizoare rotative.** Utilajul de bază și schema electrică a circuitului principal de forță sînt prezentate în figura 4.11.

Motorul sincron antrenează axial de o parte și de alta două generatoare de curent continuu, formînd blocul motor-generator.

Generatoarele sînt realizate cu excitație separată $Ex_1$ și $Ex_2$ a căror alimentare este dată de excitatricea *ExGP*, antrenată prin curea de la axul motorului sincron. La rîndul ei, excitatricea este realizată tot cu înfășurare de excitație separată și alimentată de la excitatricea *Exg* plasată pe axul convertizorului *ARNO*. Reglajul tensiunii generatoarelor principale nu se face prin curentul de excitație al excitatricei principale *ExGP* care atinge 140 A la 85 V pentru generatorul de tracțiune a cărui putere este 1250 CP, ci prin reglajul excitației excitatricei *Exg* la care valoarea curentului nu depășește 20 A; în acest mod se simplifică aparatajul de comutare și de reglaj.

Fiecare generator alimentează trei motoare de tracțiune conectate în permanență în paralel.

Motorul sincron de antrenare nepermiţînd supraîncărcare, altminteri se decroşează, impune condiţia limitării automate a puterii generatoarelor, condiţie care evident complică schema.

O altă particularitate a schemei constă în aceea că şuntarea motoarelor de tracţiune în trepte cum se obişnuieşte la alte tipuri de locomotive, este înlocuită printr-un reglaj progresiv şi automat al excitaţiei motoarelor, astfel încît caracteristica de tracţiune $F_0 = f(V)$ se apropie mult de o hiperbolă de putere constantă.

4.4.3. **Concluzii privind locomotiva mono-continuă cu grupuri convertizoare rotative.** Din examinarea schemei şi a utilajului se constată că acest tip de locomotivă apare ca o substaţie mobilă, cu utilaje grele şi mase mari în mişcare de rotaţie.

Puterea utilă se instalează de patru ori: în motoarele de tracţiune, în generatorul de tracţiune, în motorul sincron şi în transformator. Aceasta conduce la un randament total scăzut, de ordinul 0,76. Datorită însă factorului de putere unitar la care lucrează, consumul de energie la barele substaţiei de tracţiune este mai redus decît la locomotiva cu motoare monofazate 16 2/3 Hz sau 50 Hz.

Puterea specifică CP/kg este foarte scăzută. Cu toate acestea, indicatorul tone brute remorcate/tone greutate locomotivă este mult mai favorabil, comparativ cu locomotiva de curent continuu.

Viteza maximă constructivă este destul de redusă, datorită puterii specifice, ceea ce face locomotiva aptă numai pentru serviciul greu de marfă.

Datorită acestor considerente, astăzi nu se mai construieşte acest tip de locomotivă.

## 4.5. LOCOMOTIVA DE CURENT ALTERNATIV MONOFAZAT 50 Hz CU MOTOARE MONOFAZATE TIP SERIE

4.5.1. **Generalităţi.** Din punct de vedere constructiv şi funcţional această locomotivă este realizată pe acelaşi principiu ca şi locomotiva de curent monofazat şi frecvenţă 16 2/3 Hz, comportînd un transformator coborîtor de tensiune şi motoare de tracţiune tip serie pentru curent monofazat cu frecvenţa de 50 Hz.

Datorită motorului de tracţiune utilizat, acest tip de locomotivă mai este denumit prescurtat locomotivă la 50 Hz, cu motoare monofazate „directe".

Particularitatea esenţială o constituie însăşi motorul de tracţiune, în sensul realizării tehnice a acestuia la frecvenţa industrială 50 Hz, cu o funcţionare corespunzătoare în exploatare.

Problemele dificile pe care le prezintă motorul serie de curent monofazat au fost tratate la locomotiva monofazată 16 2/3 Hz (vezi cap. V § 3), unde s-a arătat că frecvenţa joasă 16 2/3 Hz a fost impusă de realizarea motorului. Simplitatea constructivă a locomotivei a determinat cercetări şi încercări în continuare pentru realizarea practică a unui motor monofazat serie direct la frecvenţa industrială 50 Hz.

Sînt construite și funcționează în exploatare automotoare, locomotive $B_0—B_0$ și locomotive $C_0—C_0$ cu motoare monofazate directe, însă performanțele de tracțiune și comportarea acestora, neridicîndu-se la nivelul vehiculelor motoare de tipul celor mono-continuu cu ignitroane sau semi-conductoare — siliciu, au determinat diversele administrații de cale ferată să-și limiteze parcul la exemplarele existente.

4.5.2. **Motorul monofazat serie cu colector pentru frecvența industrială de 50 Hz.** Dificultățile pe care le prezintă în exploatare motorul de tracțiune monofazat și măsurile constructive pentru realizarea tehnică acceptabilă a acestuia la frecvența 16 2/3 Hz au fost expuse în capitolul V § 3.

Trecerea de la frecvența 16 2/3 Hz la cea industrială 50 Hz, adică realizarea motorului de 50 Hz, complică motorul atît din punct de vedere consructi v, cît și funcțional, în special datorită agravării fenomenului comutației trovocat de forța electromotoare transformatorică indusă în secția de comupație scurtcircuitată de perie.

Tehnica actuală a măsurilor constructive care au condus al realizarea motorului de tracțiune monofazat serie de 50 Hz rezultă din examinarea relației forței electromotoare transformatorice:

$$e_{tr} = 2\pi \cdot f \cdot \Phi \cdot w_s \,[\mathrm{V}] \tag{1}$$

în care:

$e_{tr}$ este valoarea eficace a forței electromotoare transformatorice, în V;

$f$ — frecvența curentului de alimentare, în Hz;

$\Phi$ — fluxul efectiv pe pol, în Wb (1 Wb = $10^8$Mx);

$w_s$ — numărul de spire al secției de comutație.

De asemenea, trebuie stabilită și ecuația de legătură dintre forța contraelectromotoare a motorului (de care depinde puterea) și $e_{tr}$.

Forța contraelectromotoare a motorului este dată de relația:

$$E_c = \frac{p}{a} N \cdot \Phi \cdot n \,[\mathrm{V}], \tag{2}$$

în care:

$p$ este numărul perechilor de poli;

$a$ — numărul căilor de curent în paralel pe indus;

$n$ — turația indusului, în rot/s;

$N$ — numărul de conductoare ale indusului.

Viteza periferică a colectorului poate fi exprimată sub forma:

$$v_c = \frac{l \cdot d \cdot n}{1\,000}, \mathrm{m/s}, \tag{3}$$

în care:

$l$ — este numărul lamelelor pe colector;

$d$ — lățimea unei lamele pe colector, în mm.

Numărul spirelor între două lamele vecine pe periferia colectorului se poate exprima prin relația:

$$w_s = \frac{N}{2 \cdot l} \frac{p}{a}. \tag{4}$$

Din relația (1) rezultă:

$$\Phi = \frac{e_{tr}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot w_s}, \text{ Wb.} \tag{5}$$

Din relația (3) rezultă:

$$n = \frac{1\,000 \cdot v_c}{l \cdot d} \text{ rot/s.} \tag{6}$$

Introducînd în relația (2) valorile lui $\Phi$ și $n$, determinate în relațiile (5) și (6), și ținînd seama de valoarea lui $w_s$ din relația (4), rezultă:

$$E_c = \frac{1000 \cdot e_{tr} \cdot v_c}{\pi \cdot f \cdot d} \text{ [V].} \tag{7}$$

Examinarea relațiilor (1) și (7) conduce la următoarele concluzii:

— pentru o aceeași valoare-limită a lui $e_{tr}$, trecerea de la $f = 16\ 2/3$ Hz la $f = 50$ Hz conduce la micșorarea lui $E_c$ de trei ori, ceea ce influențează asupra realizării unui motor de putere mare; la motoarele realizate, tensiunea maximă pe motor este plafonată la 250 ... 300 V;

— fluxul pe pol se micșorează de trei ori, respectiv și puterea pe pol; la motoarele monofazate 16 2/3 Hz s-a ajuns la 100 CP/pol, iar la cele de 50 Hz nu s-a depășit 30 CP/pol;

— numărul spirelor pe secție $w_s$ trebuie micșorat și mai mult, ajungînd la fracțiune pe spiră între două lamele, ceea ce conduce la un colector cu dimensiune radială mare;

— viteza periferică a colectorului $v_c$ trebuie împinsă către limita maximă admisă; s-a ajuns, la motoarele de 50 Hz realizate, la 53 m/s.

Chiar dacă se împing toți parametrii constructivi menționați la valorile maxime posibile, realizarea motorului de 50 Hz cu o putere de același ordin de mărime ca cel de 16 2/3 Hz pentru locomotive magistrale și de același gabarit ridică totuși dificultăți, impunînd recurgerea și la alte măsuri constructive suplimentare.

Dintre soluțiile realizate și încercate în practică se menționează:

— montarea a două motoare pe osie (motoare jumelate), fiecare motor atacînd cu pinionul său o roată dințată comună. Cele două motoare care antrenează aceeași osie sînt cuplate în permanență în serie sub o tensiune dublă față de cea admisă de un motor;

— folosirea motorului „tandem" la care pe același ax se află doi induși în interiorul aceleiași carcase, cu legarea în serie a celor doi induși ca în cazul motoarelor jumelate; construcția motorului tandem este posibilă întrucît la trecerea de la 16 2/3 la 50 Hz, lungimea axială a fierului se reduce aproximativ la 1/3 din aceea necesară la frecvența 16 2/3 Hz.;

— folosirea motorului cu înfășurare de indus „dublă-paralelă", soluție realizată de firma Öerlikon și care constă în plasarea a două înfășurări în aceeași crestătură de indus, din care una se leagă la lamelele pare ale colectorului, iar cealaltă la lamelele impare; această soluție permite dublarea fluxului pe pol, în raport cu înfășurarea clasică și conduce la o dimensionare normală a motorului atît ca diametru, cît și ca lungime.

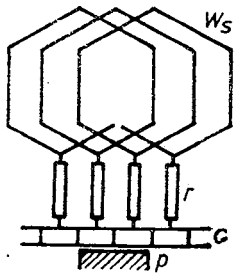



*Fig. 4.12.* Schema conexiunilor rezistente.

Soluțiile cu motoare jumelate și cu motor tandem sînt costisitoare; soluția cu înfășurarea de indus „dublă-paralelă" s-a dovedit a fi corespunzătoare în practică.

Pentru compensarea forței electromotoare transformatorice se aplică aceeași metodă ca la motoarele 16 2/3 Hz, adică șuntarea polilor de comutație pe rezistențe, însă valoarea reziduală necompensată, se împinge pînă la 4 și chiar 4,75 V.

Pentru diminuarea comutației datorită lui $e_{tr}$ sporit, constructiv se recurge la realizarea de „conexiuni rezistente" *(metoda Lame)*, ca în figura 4.12 de unde și denumirea de „motor cu conexiuni rezistente".

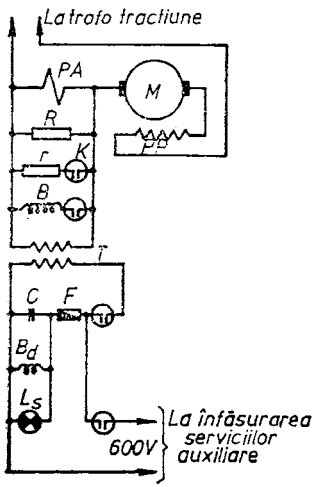



*Fig. 4.13.* Schema reglării comutației la motorul monofazat 50 Hz : $B$ — selful pentru descărcarea capacităților; $L_s$ — lampă de semnalizare (capacități neconectate); $K$ — contactoare; $F$ — siguranță de protecție.

Admițînd un plafon mai ridicat pentru $e_{tr}$ pentru a limita valoarea curentului de scurtcircuit în secția $w_s$ ce intră în comutație, legătura spirei (spirelor) la lamelele colectorului se face prin intermediul unor rezistențe $r$.

Banda de rezistențe produce însă o încălzire suplimentară a motorului, ceea ce necesită realizarea unor canale de ventilație practicate atît în stator, cît și în rotor.

La motorul monofazat 50 Hz, șuntarea polului de comutație pe o rezistență prezintă unele aspecte mai complicate, rezultate din necesitatea de a putea compensa forța electromotoare transformatorică nu numai la viteza de referință aleasă, ca în cazul motoarelor 16 2/3 Hz, ci și în domeniul vitezelor joase, cînd comutația este mult îngreuită, precum și în cel al vitezelor ridicate.

Se recurge în acest scop, la un șuntaj combinat care se operează în funcție de viteza locomotivei.

În figura 4.13 este reprezentată schema de reglare a comutației la motorul monofazat 50 Hz, al locomotivelor $B_0$ — $B_0$ 13 000 (SNCF).

Polii de comutație ($PA$) ai motorului sînt șuntați, în funcție de viteza locomotivei, pe o impedanță variabilă care cuprinde:

— o rezistență principală ($R$) branșată în permanență;

— o rezistență auxiliară ($r$) care se conectează în domeniul vitezelor joase (sub 30 km/h);

— o baterie de capacități ($C$) alimentată prin intermediul unui transformator ridicător ($T$) care se conectează în domeniul vitezelor joase (sub 30 km/h);

— un self, ($B$) care se conectează în domeniul vitezelor ridicate (peste 60 km/h).

Diversele cuplaje sînt realizate printr-un joc de contactoare comandate de un arbore cu came, a cărui comandă este plasată pe un dispozitiv al vitezometrului.

Treapta de șuntare cu capacități, care se menține pe durata de demaraj și pînă la viteza de 30 km/h conduce la ameliorarea factorului de putere mediu al locomotivei.

Peste viteza de 30 km/h, capacitățile sînt deconectate de la transformatorul de șuntaj $T$ și se reconectează pe o priză specială de tensiune constantă a transformatorului principal, trimițînd permanent în acesta 150 kVAR putere reactivă, ceea ce constituie un mijloc de ameliorare a căderii de tensiune în linia de contact.

4.5.3. **Reducerea cuplului la demaraj.** Curenții de scurtcircuit produși în secția de comutație de către forța electromotoare transformatorică se opun variației fluxului și reduc amplitudinea acestuia.

Cuplul motor se reduce în aceeași proporție, întrucît depinde de flux, iar efectul va fi maxim la demaraj, întrucît polul de comutație nu acționează în această perioadă, situație nedorită la un motor de tracțiune, deoarece tocmai la demaraj se cere dezvoltarea cuplului maxim. La primele motoare de 50 Hz reducerea cuplului la demaraj atinge 20...30% față de valoarea cuplului în regim uniorar.

Limitarea forței electromotoare transformatorice la valori reduse, utilizarea conexiunilor rezistente și reglajele de comutație, măsuri indispensabile diminuării comutației la demaraj, conduc implicit și la ameliorarea valorii cuplului la demaraj.

## 4.6. LOCOMOTIVE ELECTRICE DE CURENT ALTERNATIV MONOFAZAT 25 kV, 50Hz, DE TIPUL MONO-CONTINUU CU REDRESOARE STATICE IGNITROANE

Locomotiva mono-continuă cu redresoare este realizată pe principiul binecunoscut de convertire statică a curentului alternativ monofazat 50 Hz, luat de la linia de contact, în curent continuu, (ondulat) și de utilizare a acestuia în motoarele de tracțiune.

O astfel de locomotivă întrunește avantajele alimentării în curent alternativ monofazat 50 Hz a liniei de contact cu avantajele oferite de electromotorul de curent continuu pentru tracțiune.

Pe locomotivele electrice mono-continue cu redresoare, pentru redresarea curentului alternativ monofazat 50 Hz, se folosesc ignitroanele sau semiconductoare de silciu. Ambele tipuri de locomotive sînt identice ca aparataje și utilaj, ceea ce le diferențiază fiind numai agreagatul de redresare propriu-zis.

Întrucît aparatajul și echipamentul locomotivei cu ignitroane sînt aceleași ca la locomotiva cu redresoare semiconductoare, în cele de mai jos se prezintă numai problemele particulare ale redresorului locomotivei.

4.6.1. **Schema electrică a unei locomotive cu ignitroane.** Circuitul principal de forță și circuitul serviciilor auxiliare ale unei locomotive cu ignitroane sînt reprezentate în figura 4.14.

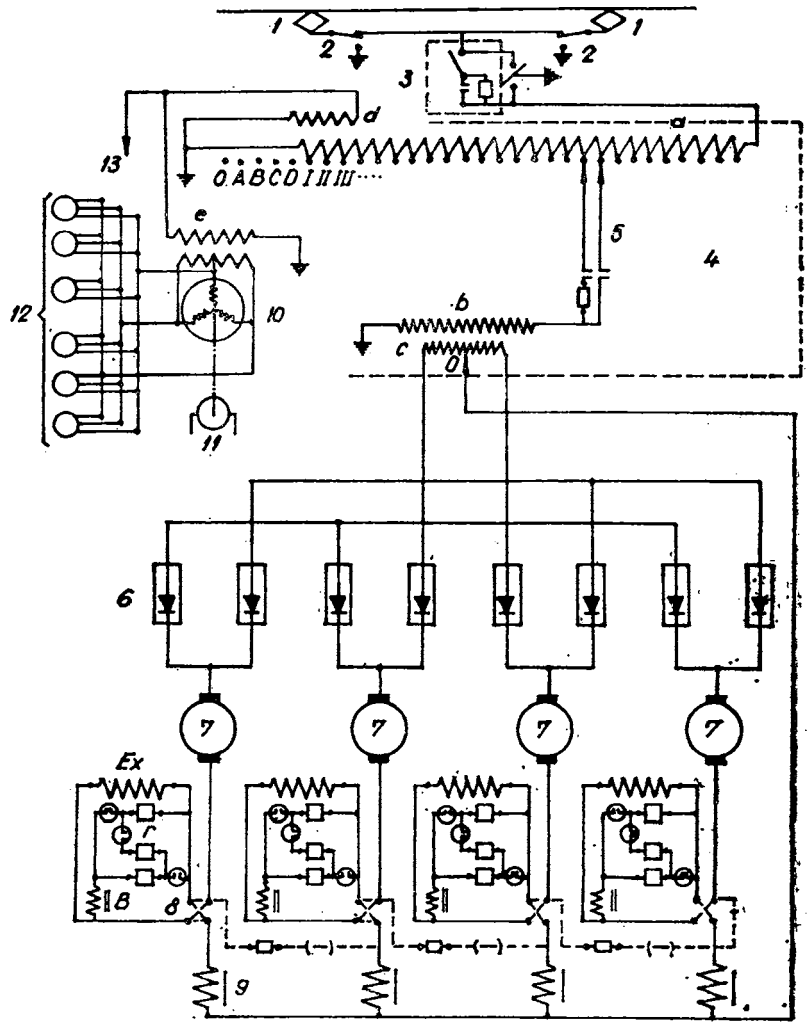



*Fig. 4.14.* Schema electrică de principiu a circuitului principal de forță și a circuitului serviciilor auxiliare la o locomotivă Bo—Bo cu ignitroane: *1*—pantografe; *2* — separatoare; *3* — întrerupător automat principal; *4* — transformator principal (*a*, *b*, *c*, *d*— înfășurările transformatorului); *5* —graduator; *6* — ignitroane; *7* — motoare de tracțiune (*E* — înfășurarea de excitație serie; *r*, *B* — șunt inductiv); *8* — inversor de mers; *9* — self de aplatisare; *10*—grup convertizor ARNO; *11*—generator pentru încărcarea bateriei; *12*—motoarele serviciilor auxiliare; *13*—circuit pentru încălzirea trenului.

4.6.2. **Noțiuni generale asupra redresoarelor cu vapori de mercur.** Redresorul se definește ca un aparat static care transformă curentul alternativ de alimentare, în curent continuu. Un redresor este considerat ideal dacă trecerea curentului este unidirecțională, adică dacă rezistența oferită la trecerea curentului este nulă pentru un sens determinat și infinită pentru sensul invers.

Cea mai largă răspîndire pentru convertirea curentului alternativ în curent continuu o avea pînă în ultima vreme redresorul cu vapori de mercur, a cărui funcționare este bazată pe proprietățile arcului electric.

Considerăm doi electrozi în contact și plasați într-un circuit. După stabilirea curentului, separînd cei doi electrozi, curentul nu se anulează și trans-

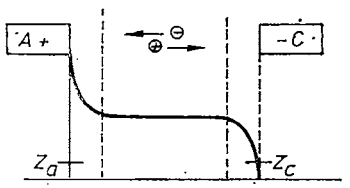



*Fig. 4.15.* Diagrama producerii unui arc electric: $A$ — anod; $C$ — catod; $Z_a$ — zonă anodică; $Z_c$ — zonă catodică.

portul de electricitate se realizează prin gazul ce înconjură electrozii, constituind un arc electric care se datorește deplasării ionilor pozitivi de la anod la catod și a electronilor negativi de al catod la anod (fig. 4.15). Arcul posedă trei zone distincte:

— partea centrală, care este prin esență o zonă de transport caracterizată printr-un gradient de potențial aproximativ constant. Transportul de electricitate se datorește în cea mai mare măsură electronilor, întrucît viteza acestora este mult mai mare decît a ionilor, dată fiind masa lor atomică redusă;

— o zonă îngustă $Z_c$, în vecinătatea catodului, denumită zona catodică, care este prin esență o zonă de producere a electronilor. Producerea electronilor se poate face prin una din metodele: ionizarea gazelor prin ionii pozitivi; bombardarea catodului prin acești ioni; încălzirea catodului; extragerea electronilor din catod printr-un cîmp intens;

Încălzirea catodului și bombardarea lui cu ioni pozitivi sînt procedeele cele mai importante. În zona catodică, concentrația în ioni este foarte mare, conducînd la un gradient de potențial ridicat. Prin urmare ionii se deplasează în această zonă cu viteză mare și posedă o energie cinetică suficientă pentru a extrage electronii din metal.

— o zonă îngustă $Z_a$, în vecinătatea anodului, denumită zona anodică, care este prin esență o zonă de producere a ionilor. Ionii nu pot proveni din metal, ci sînt produși prin ionizarea moleculelor din gazul înconjurător anodului. Această ionizare produsă de electroni nu este posibilă decît datorită vitezei mari a electronilor și unui gradient de potențial ridicat, obținut printr-o mare concentrație de electroni în zona anodică.

Diagrama de potențial în lungul arcului electric are aspectul arătat în figura 4.15. În ipoteza că se inversează brusc polaritatea, arcul electric se reamorsează imediat în sens invers, întrucît toate elementele sînt în situație favorabilă funcționării lui; anodul, aflîndu-se la temperatură ridicată, va elibera electroni.

Dacă se dorește realizarea unui arc electric care să nu se amorseze decît numai într-un sens, trebuie produsă o disimetrie de elemente fie întrebuințînd doi electrozi, dintre care unul să poată elibera electroni mai ușor decît altul, fie împiedicînd, cu ajutorul unei răciri energice, încălzirea unuia dintre electrozi, suprimîndu-i astfel posibilitatea de producție a electronilor.

Prin aceste procedee, numai unul din electrozi (catodul) poate emite electroni. În ipoteza că anodul este negativ în raport cu catodul, electronii emiși de acesta vor fi respinși de anod; dimpotrivă, atunci cînd anodul este pozitiv în raport cu catodul, electronii vor fi atrași către anod. Curentul nu va putea circula decît cînd anodul este pozitiv în raport cu catodul.

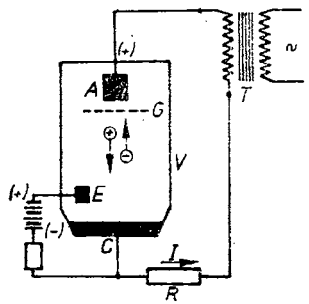



*Fig. 4.16.* Principiul unui redresor monoanodic cu vapori de mercur: $V$ — recipient; $A$ — anod; $C$ — catod; $E$ — electrod auxiliar; $R$ — rezistență (consumator); $G$ — grilă de polarizare.

*a) Funcționarea redresorului cu vapori de mercur.* Principiul unui redresor cu vapori de mercur este reprezentat în figura 4.16.

Un redresor cu vapori de mercur cuprinde în esență elementele următoare:

— un recipient $V$, ermetic închis, în care se face vid. În cazul redresoarelor capsulate, vidul se poate realiza o dată pentru totdeauna, fără să fie deci necesar aparataj pentru întreținerea lui; în cazul redresoarelor cu pompă, vidul se menține cu ajutorul unei pompe asociate redresorului;

— doi electrozi izolați față de recipient: un anod $A$, de regulă din grafit, și deci neemis, și un catod $C$, de regulă alcătuit dintr-o baie de mercur, deci emisiv;

— un electrod auxiliar, $E$, care, printr-un procedeu oarecare, stabilește între $E$ și $C$ un arc electric, datorită căruia un punct al catodului este adus la incandescență, creînd o sursă de emitere de electroni.

Cînd se aplică tensiune redresorului, electronii emiși de catod sînt supuși cîmpului electric dintre anod și catod. Dacă anodul este negativ în raport cu catodul, electronii emiși de acesta vor fi respinși de anod și, dimpotrivă dacă anodul este pozitiv în raport cu catodul, electronii vor fi atrași de către anod, iar arcul electric se va stabili între $C$ și $A$ și curentul va putea circula. Mercurul, care constituie catodul, sub acțiunea temperaturii ridicate a arcului, se vaporizează, însă vaporii se condensează pe suprafața internă a recipientului de unde se scurge în baia de mercur care se regenerează astfel în mod automat.

În momentul cînd se aplică tensiunea pozitivă anodului, electronii emiși de catod sînt atrași de anod. Datorită vitezei lor mari, electronii bombardează atomii de vapori de mercur (atomul are un sîmbure material pozitiv în jurul căruia gravitează un număr de electroni cărora le smulge electronii și care se dirijează tot către anod sub influența cîmpului electric). Atomii de vapori de mercur, lipsiți de electroni, devin elemente materiale pozitive numite „ioni" care se dirijează către catod sub influența aceluiași cîmp electric. Ionii produși prin acest fenomen, denumit fenomen de ionizare, compensează sarcina spațială a electronilor smulși de pe catod.

Dubla circulație, de electroni către anod și de ioni către catod, constituie arcul electric și durează atîta timp cît anodul se găsește la un potențial pozitiv superior față de catod.

În momentul cînd potențialul anodului este mai mic decît al catodului, sensul cîmpului se schimbă, iar arcul se stinge, întrucît anodul este neemisiv.

Datorită vidului intens și vaporizației de mercur, conductivitatea mediului între catod și anod este considerabil de mare și transportul de energie se face cu o cădere de tensiune redusă. Această cădere de tensiune, denumită cădere de tensiune în arc, este de ordinul a 15...30 V pentru redresoarele cu vapori de mercur.

Din cele de mai sus rezultă că un redresor cu mercur, pentru ca să transforme curentul alternativ în curent continuu, trebuie să îndeplinească următoarele condiții:

— gazul din interiorul vasului să aibă o presiune convenabilă pentru a permite o ionizare suficientă;

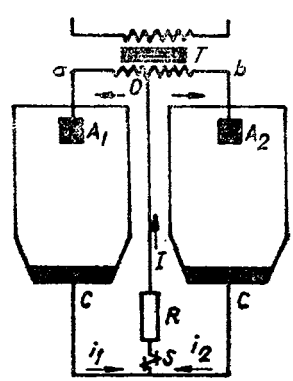
— anodul să fie pozitiv în raport cu catodul;

— printr-un mijloc oarecare, să se creeze un arc între electrodul auxiliar și catod, adică să se producă o pată catodică emisivă de electroni.

Alimentînd redresorul monoanodic cu o tensiune $u_2$ (sinusoidală) de la secundarul transformatorului $T$ (fig. 4.17), redresorul fiind amorsat, curentul nu va trece decît în timpul alternanței (semiperioadei), în cursul căreia anodul $A$ este pozitiv în raport cu catodul. Tensiunea în circuitul de utilizare ($u_d$) va fi formată dintr-o succesiune de pulsații pozitive intermitente, fiecare durînd o semiperioadă. Curentul redresat este pulsatoriu și are aceeași formă ca și tensiunea în ipoteza că sarcina $R$ este o rezistență ohmică pură.

*b) Montajul a două redresoare monoanodice.* Pentru ameliorarea formei curentului redresat se poate trece la montajul cu două redresoare monoano-

*Fig. 4.18.* Schema de montaj cu punct median (push-pull) a două redresoare monoanodice.



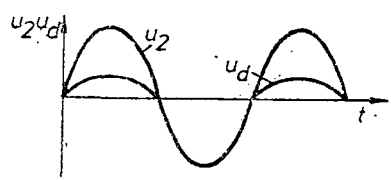




*Fig. 4.17.* Diagrama tensiunii redresate la un redresor monoanodic.

dice ca în schema din figura 4.18 (montaj cu punct median sau montaj push-pull).

Printr-un procedeu oarecare, pata catodică fiind creată în fiecare din redresoarele monoanodice, arcul se va putea stabili succesiv între catod și fiecare dintre anozi.

Circuitul de utilizare legîndu-se între catod şi punctul median al transformatorului, forţele electromotoare între $O_a$ şi $O_b$ la secundarul transformatorului vor fi sinusoidale, egale şi în opoziţie de fază (figura 4.19).

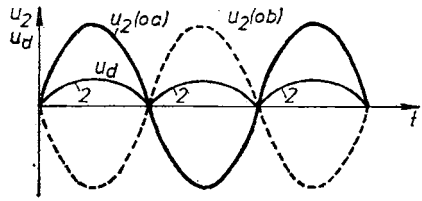



*Fig. 4.19.* Diagrama tensiunii redresate în cazul schemei de montaj cu punct median (schema cu două pulsuri).

Neglijînd fenomenul de comutaţie, în redresoare, tensiunea redresată $U_d$ în circuitul de utilizare reprezintă o succesiune de semiunde sinusoidale.

În ceea ce priveşte forma curentului redresat, ea depinde de natura consumatorului $R$, care poate fi rezistenţă pură, reactanţă pură, sau în cazul real, între acestea două.

În vederea reducerii pulsaţiei curentului redresat faţă de valoarea sa medie, în circuitul de utilizare se introduce o bobină de selfinducţie $SL$ denumită „self de aplatisare" sau „self de filtraj".

*c) Funcţionarea grilei.* În cazul specific al redresoarelor cu aplicaţie pentru tracţiune, rolul pe care îl joacă grila $G$ (fig. 4.16) este foarte redus. Dacă se plasează o grilă în vecinătatea anodului în traiectul arcului şi dacă se aplică grilei un potenţial negativ suficient, ea împiedică aprinderea arcului respingînd electronii emişi de catod.

În momentul cînd se doreşte aprinderea anodului (preluarea arcului electric de către anod), dacă se aplică grilei o tensiune pozitivă în raport cu catodul, aceasta uşurează aprinderea anodului.

În acest mod grila joacă rolul de a controla momentul de aprindere a arcului.

În timpul cît arcul funcţionează, grila nu se opune trecerii acestuia.

În momentul stingerii arcului, cînd anodul devine negativ în raport cu catodul, se creează pericolul ca anodul să atragă ionii pozitivi, ceea ce poate crea accidental pe el o pată catodică şi poate provoca accidentul cunoscut sub denumirea de „aprindere inversă", care echivalează cu un scurtcircuit al redresorului (respectiv al secundarul transformatorului).

În acest moment, dacă se aplică grilei o polaritate negativă ea aflîndu-se într-un mediu conţinînd electroni şi ioni, respinge electronii şi atrage ionii, îndeplinind astfel un al doilea rol şi anume de a accelera dezionizarea regiunii anodice în momentul stingerii arcului, defavorizînd astfel aprinderea inversă.

### 4.6.3. Redresoare ignitronice pentru locomotive electrice

*a) Consideraţii generale.* Redresorul polianodic nu a găsit o aplicare consacrată pe locomotivele electrice, pentru următoarele motive:

— pata catodică este persistentă şi cu mişcări dezordonate la suprafaţa mercurului (se deplasează cu o viteză de circa 1 m/s sub fiecare anod), ceea ce conduce la o puternică ionizare a mediului şi favorizează aprinderea inversă a redresorului;

— anozii se dispun împrejurul camerei de condensare a aparatului, care este de dimensiuni relativ mari, dispoziție care conduce la un ancombrament relativ mare al aparatului;

— o singură defecțiune scoate din serviciu întreg redresorul;

— traiectul arcului, ghidat prin brațele anodului, este lung în raport cu secțiunea sa, ceea ce provoacă o cădere de tensiune internă relativ ridicată, care la rîndul său influențează asupra randamentului și capacității de supraîncărcare (capacitatea de supraîncărcare derivă din posibilitatea redresorului de a produce instantaneu o cantitate de vapori ionizabili suficientă, cînd sarcina de tracțiune, respectiv curentul din electromotoare, crește).

Condițiile specifice ale unei locomotive electrice, în ceea ce privește redresorul, cer o construcție mai simplă și mai robustă, o mai mare elasticitate în exploatare, o ameliorare a randamentului, o capacitate mare de supraîncărcare, bineînțeles toate acestea fără a reduce din siguranța de funcționare. S-a ajuns astfel la tuburile redresoare monoanodice, cu posibilitatea de a grupa mai multe asemenea tuburi, formînd un bloc redresor. Un tub redresor monoanodic nu prezintă inconvenientele citate mai sus pentru redresorul polianodic, este interschimbabil, are dimensiuni reduse și se pretează la cele mai variate și ușoare montaje.

În practică există două tipuri de tuburi monoanodice: excitroane și ignitroane. Într-un excitron, pata catodică este întreținută în permanență, în timp ce originalitatea unui ignitron constă în faptul că pata catodică nu este întreținută în permanență. Un electrod special denumit „ignitor" (de unde denumirea generală a tubului monoanodic — redresor ignitronic sau pe scurt „ignitron"), realizat dintr-un material semiconductor pe bază de bor și compușii acestuia, se scufundă în mercurul catodului și este supus la impulsuri de tensiune sincrone cu tensiunea anodului, însă cu un defazaj reglabil în raport cu aceasta. Acest ignitor creează pata catodică la fiecare perioadă a curentului alternativ în momentul dorit pentru aprinderea anodului. Cînd arcul anodului se stinge, dispare evident și pata catodică, ceea ce antrenează o ionizare mai redusă în tub.

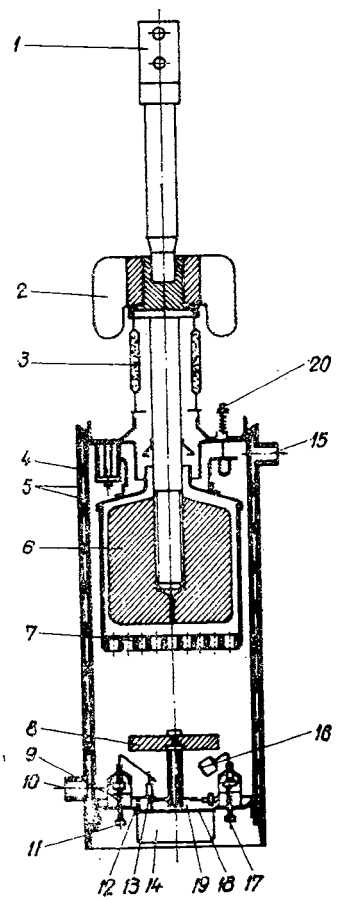



*Fig. 4.20.* Secțiune schematică printr-un ignitron.

*b) Elementele constitutive și modul de funcționare a unui ignitron.* În figura 4.20 se prezintă o secțiune printr-un ignitron.

Elementele constitutive ale unui ignitron sînt:

— Un catod (*18*) alcătuit dintr-o baie de mercur, situat la partea inferioară a tubului; cuva are o formă de oală pentru a limita deplasările mercurului în timpul oscilației vehiculului.

— Un anod principal (*6*) din grafit, înconjurat de o grilă (*7*) cu o secțiune mare de trecere și alimentat cu o tensiune alternativă defazată cu 30...60° în avans față de tensiunea anodică. Astfel alimentată, grila are rolul de a ușura amorsarea arcului la începutul perioadei de conducție și de a accelera dezionizarea regiunii anodice după ce tubul a încetat să lase trecerea curentului.

— Două ignitoare (*13*), dintre care unul de rezervă, cufundați în mercur cîțiva mm. Rolul ignitorului este de a crea pata catodică, în care scop se trimite în el un impuls de curent în momentul cînd se dorește ca elementul catod să fie sediul unei emisiuni electronice, adică în momentul amorsării arcului.

Ignitronul este alcătuit dintr-o mică bară semiconductoare, susținută de o tijă metalică (suportul ignitorului), prin care se aduce și curentul, și este izolat de restul aparatului printr-un izolator etanș.

Cînd suportul ignitorului este pozitiv în raport cu catodul, potențialul nu se repartizează egal în lungul barei semiconductoare, ci se concentrează aproape în întregime în punctul de contact cu mercurul.

Pentru o tensiune aplicată la ignitor de ordinul a 200 V și un curent de 30...40 A, cîmpul electric capătă o valoare destul de ridicată, capabilă să producă arcul electric care naște pata catodică, arcul fiind apoi preluat de anodul principal.

— Un anod auxiliar (*16*), figura 4.20, care servește la ușurarea funcționării ignitronului la sarcini foarte joase.

— Un ecran (*8*) care împiedică împroșcarea mercurului datorită oscilațiilor vehiculului.

Aceste diverse elemente sînt închise într-o cuvă metalică din oțel inoxidabil, complet capsulată cu pereți dubli (*5*), în care se face vid o dată pentru totdeauna. Anodul principal este izolat, față de cuvă, trecerea lui făcîndu-se etanș printr-o masă de sticlă (*3*) turnată. Anodul are în partea sa exterioară un radiator cu aripioare *2*, înconjurat cu un element denumit preîncălzitorul anodului. Aceste două elemente, radiator și preîncălzitor (ambele alimentate simultan și constant), par la prima vedere contradictorii; în realitate, aceste două elemente se completează pentru a menține temperatura dorită în regiunea anodică. În această regiune trebuie să fie menținut un regim de temperatură astfel, încît să se evite condensarea mercurului pe anod, altfel regiunea anodică ar putea deveni emisivă și ar facilita aprinderea inversă a ignitronului. Acțiunea radiatorului cu aripioare, ca la toate radiatoarele de acest fel, va fi neglijabilă cînd temperatura anodului va fi scăzută în timp ce acțiunea sa va fi apreciabilă pentru temperaturile ridicate ale anodului.

În perioada de punere în funcțiune a ignitronului (funcționarea în gol), sau în timpul funcționării lui cu sarcină scăzută, trecerea curentului prin ignitron va încălzi puțin anodul și preîncălzitorul va interveni aproape exclusiv pentru încălzirea anodului, în timp ce acțiunea radiatorului va fi slabă.

La sarcini mari, trecerea curentului (a cărui valoare va fi evident mare) va provoca încălzirea puternică a anodului, în care caz rolul preîncălzitorului va fi slab, iar radiatorul cu aripioare va evacua în aceste momente o mare parte din căldură.

Între cei doi pereți ai cuvei, prin serpentina *4* se trece un curent de apă care permite obținerea condițiilor optime de temperatură necesară bunei funcționări a ignitronului.

Agentul refrigerent nu este apă curată, ci un amestec de apă distilată și etilglicol, incongelabil și cu bune caracteristici termice.

Pentru ignitroanele capsulate folosite pe locomotive se utilizează aproape exclusiv sistemul de răcire cu apă, preferîndu-se acesta în locul unei răciri cu aer (de asemenea posibilă), întrucît din punct de vedere fizic prezintă o mai bună eficacitate, evită punctele calde în ignitron și oferă un mare avantaj termic în caz de suprasarcină. Datorită sistemului de răcire cu apă se diminuează foarte mult dimensiunile ignitronului și se asigură o presiune a vaporilor de mercur în interior aproape constantă, ceea ce permite o funcționare sigură mai ales în cazul suprasarcinilor brutale.

c) *Condițiile pentru buna funcționare a unui ignitron* sînt următoarele:

— anodului trebuie să i se aplice un potențial pozitiv în raport cu catodul și superior acestuia, condiție ce se realizează la fiecare semiperioadă pozitivă;

— catodul trebuie să fie sediul unei emisii electronice, lucru ce se obține prin crearea amorsajului arcului de către ignitor la fiecare perioadă;

— anodul auxiliar și grila trebuie să fie pozitive în raport cu catodul în momentul amorsării arcului; tensiunea lor trebuie să fie defazată înainte față de tensiunea anodică; anodul auxiliar și grila ajută la propagarea arcului electric;

— ignitronul trebuie menținut la o temperatură optimă în timpul funcționării.

Primele trei condiții sînt îndeplinite de circuitele de excitație a ignitronului, iar condiția ultimă este îndeplinită de sistemul de răcire a ignitronului.

d) *Circuitele de excitație a ignitronului.* Circuitele pentru alimentarea ignitorului, a grilei și a anodului auxiliar alcătuiesc așa-numitele circuite de excitație ale ignitronului. În figura 4.21 s-a prezentat schema circuitului de excitație pentru două tuburi, fiecare tub redresînd cîte o alternanță.

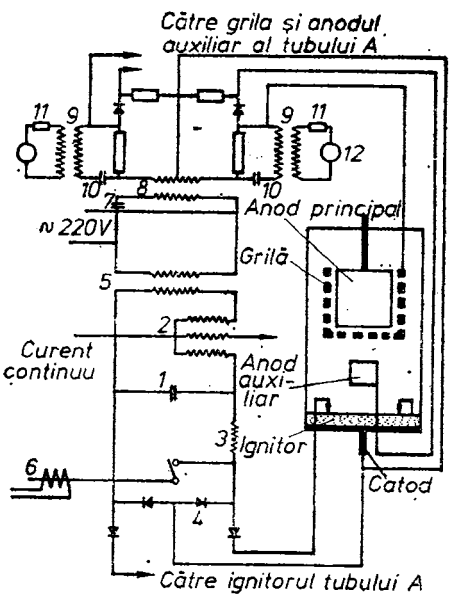



*Fig. 4.21.* Circuitul de excitație a ignitroanelor.

Acest circuit, pentru clarificare, poate fi descompus în circuitul de alimentare a ignitoarelor celor două tuburi (fig. 4.22) și în circuitul de alimentare a grilelor și a anozilor auxiliari (fig. 4.23).

Circuitul de alimentare a ignitoarelor. Aplicînd o tensiune suficientă între ignitor și catod, în punctul de contact cu mercurul ia naștere un gradient de potențial ridicat, care, combinat cu încălzirea locală prin efect Joule-Lenz, creează o mică pată emisivă și un mic arc care scurtcircuitează ignitorul. Fenomenul continuă și se amplifică dacă sursa de excitație are putere suficientă pentru a alimenta arcul ignitorului.

Circuitul de alimentare al ignitorului trebuie să producă impulsuri scurte (10...100 ms) de fază, reglabile și precise, cu o intensitate de ordinul a 30 ··· 40 A. În acest scop, circuitul se prevede cu elementele din figura 4.22.

— un condensator 1 care înmagazinează energia;

— o reactanță *2* reglabilă printr-o polarizare, alimentată în curent continuu de ordinul 1 A, de la bateria de acumulatoare; la fiecare valoare a curentului de polarizare, corespunde deci o valoare a reactanței;

— o reactanță saturabilă *3*, datorită căreia curentul nu va putea circula în circuitul care cuprinde această reactanță decît atunci cînd tensiunea aplicată va atinge o valoare egală cu cea care a provocat saturația;

— redresoarele *4*, care au scopul de a împiedica aplicarea unei tensiuni inverse ignitorului.

Aceste redresoare dirijează succesiv descărcarea condensatorului către fiecare din ignitoare. Funcționarea în ansamblu a circuitului de alimentare a ignitorului se petrece în modul următor. Transformatorul *5* fiind sub tensiune, condensatorul *1* se va încărca și, pentru o valoare determinată de curentul de polarizare a reactanței reglabile *2*, va atinge la un moment dat (fixat de valoarea reactanței astfel realizate) o tensiune egală aceleia care a provocat saturația reactanței saturabile *3*. În acest moment condensatorul se descarcă și, datorită redresoarelor *4*, descărcările provocate la fiecare alternanță vor fi utilizate succesiv pentru cele două tuburi ai căror anozi sînt în opoziție de fază.

În acest circuit mai este plasat și un contactor *6* (vezi fig. 4.21), al cărui rol este de a scurtcircuita ignitoarele, împiedicînd astfel aprinderea ignitoa-

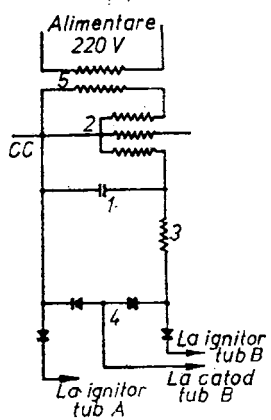



*Fig. 4.22.* Circuitul de alimentare a ignitoarelor.

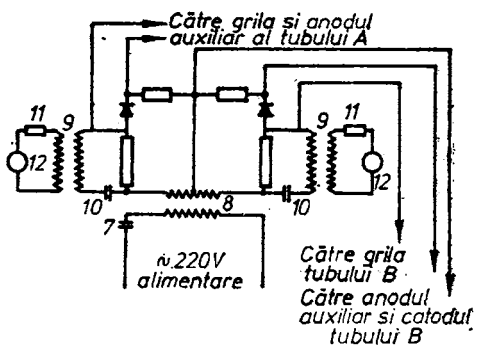



*Fig. 4.23.* Circuitul de alimentare a grilelor și anozilor auxiliari.

relor, independent de alimentarea circuitelor de excitație. Cu alte cuvinte, cu ajutorul acestui contactor, cînd este închis, ignitorul poate juca rolul de întreruptor, adică de a tăia circuitul în care intervin aceste ignitoare, independent de alte elemente ale circuitului. Această posibilitate este utilizată, de exemplu, pentru a scoate din serviciu circuitul alimentat de ignitoarele respective (cele două tuburi).

*Circuitul de alimentare a grilelor și a anozilor auxiliari* (fig.. 4.23). Așa cum s-a precizat mai sus, condițiile impuse acestui circuit sînt de a ali-

menta grila și anodul auxiliar ale fiecăruia dintre cele două tuburi cu o tensiune în avans cu un unghi oarecare față de tensiunea anod-catod și ignitorului.

Defazajul dorit se obține prin introducerea unui condensator *7* în circuitul primar al transformatorului *8* de alimentare a grilelor și anozilor auxiliari.

Funcționarea circuitelor grilei și anodului auxiliar este semnalizată de circuitul de semnalizare care cuprinde transformatorul *9*, condensatorul *10*. rezistența *11* și lampa de semnalizare *12*.

4.6.4. **Scheme de montaj a ignitroanelor pe locomotivă.** La alcătuirea redresorului pe locomotivă, ignitroanele pot fi montate în schema denumită „cu punct median" („push-pull" sau „du-te-vino"), sau *schema punte Grätz* (fig. 4.24 și fig. 4.25); în ambele scheme se redresează ambele alternante, de aceea mai sînt denumite și scheme cu două pulsuri.

În cazul montajului push-pull, pentru o semialternanță lucrează ignitronul *1* (ignitronul *2* este blocat), iar pentru cealaltă semialternanță lucrează ignitronul *2* (ignitronul *1* este blocat din cauză că pe el se aplică alternanța negativă).

La montajul în punte, pentru o semialternanță conduc ignitronii *1—3*, iar pentru cealaltă alternanță conduc ignitronii *2—4*.

Pentru ambele montaje tensiunea redresată are aceeași formă (curba $u_d$ — fig. 4.19).

Ținînd seamă de faptul că tehnica actuală realizează tuburi ignitorice cu parametri (putere, curent, tensiune) comparabili (pentru un tub) cu ai

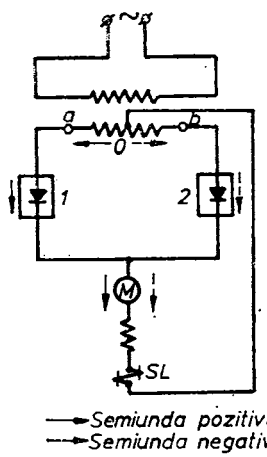



*Fig. 4.24.* Schema de montaj ca punct median (push-pull).

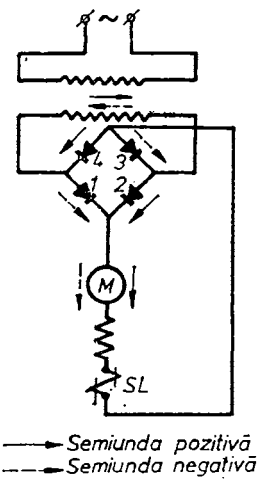



*Fig. 4.25.* Schema de montaj în punte.

unui motor de tracțiune de putere mare, schema push-pull este aceea care se folosește generalizat pe locomotive.

Față de schema punte, montajul push-pull are următoarele avantaje:

— pentru cazul cînd un tub ignitronic are parametrii comparabili cu ai motorului de tracțiune, schema push-pull necesită doi ignitroni, față de patru necesari în schema punte.

— ignitronii răcindu-se exclusiv cu apă, soluția este eficientă și posibilă numai la montajul push-pull, unde catozii celor două tuburi ce alimentează un motor sînt la același potențial (catozii sînt legați între ei); instalația de

răcire cu apă fiind incomparabil mai simplă, față de montajul punte unde numărul tuburilor este dublu.

Montajul push-pull are însă dezavantajul că secundarul transformatorului este prost utilizat (jumătate din timp-jumătate de înfășurare; pentru o semialternanță înfășurarea *Oa*, pentru cealaltă semialternanță înfășurarea *Ob*), ceea ce conduce la supradimensionarea transformatorului. Asupra factorilor de schemă și compararea celor două montaje se revine cu detalii la locomotiva cu redresoare semiconductoare siliciu (vezi cap. 5, §5).

### 4.6.5. Circuitul de răcire a ignitroanelor

*a) Temperaturile de funcționare.* Funcționarea optimă a redresorului se obține atunci cînd presiunea gazului din interiorul cuvei este cuprinsă între anumite limite și cînd regimul intern de vaporizare și condensare a mercurului sînt corect realizate prin dispoziția pieselor, iar temperatura peretelui rece este menținută în jurul unei temperaturi de 45...55°C. O temperatură sub sau peste limitele prescrise poate provoca supratensiuni periculoase în transformatorul de alimentare sau aprindere inversă.

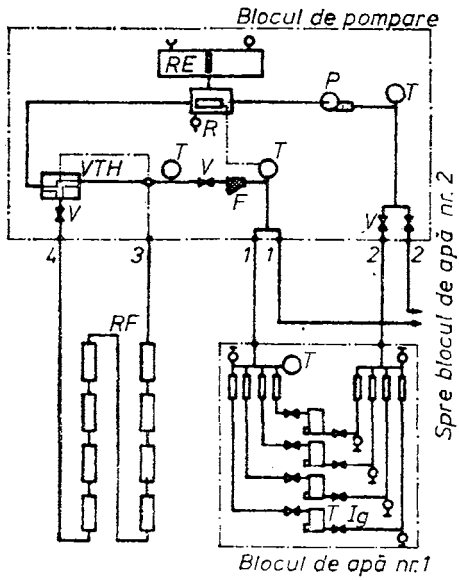



*Fig. 4.26.* Schema instalației de răcire cu apă a unui bloc redresor cu patru tuburi ignitronice: *RE* — rezervor de expansiune; *R* — preîncălzitor; *P* — pompă de circulație; $TI_g$ — tub ignitronic; *F* — filtru; *VTH* — vană cu două căi; *RF* — răcitor; *T* — termostat; *V* — vane.

Datorită acestor condiții riguroase de temperatură, ignitroanele pentru tracțiune se răcesc cu apă, a cărei temperatură se menține în limitele 20...55°C, la intrare și la ieșire, printr-un reglaj automat efectuat de un termostat. În ipoteza că temperatura apei de răcire iese din limitele prescrise, se declanșează automat scoaterea ignitronului din funcțiune.

*b) Schema circuitului de răcire cu apă* (fig. 4.26). Ansamblul instalației trebuie să asigure: circulația apei, reglarea temperaturii apei pentru funcționarea normală și controlul temperaturii pentru asigurarea protecției tubului.

Apa de răcire din rezervorul de expansiune *RE* este aspirată prin preîncălzitorul *R* de către pompa *P* și refulată în serpentina plasată în peretele dublu al ignitronului.

La ieșirea din ignitron circuitul de apă se continuă prin filtrul *F*, iar de aici se reîntoarce la rezervorul de expansiune fie printr-un circuit trecînd prin răcitorul *RF*; circuitul este comandat de vana cu două căi *VTH*, care este sub controlul unui termostat.

Cînd temperatura apei este inferioară celei prescrise, circuitul urmează calea directă *F—VTH—RE*, iar elementele încălzitoare ale preîncălzitorului *R* sînt sub tensiune.

Cînd temperatura apei este în limitele prescrise, circuitul urmează calea directă *F—VTH—RE*, însă elementele încălzitoare ale preîncălzitorului *R* sînt deconectate, la intervenția unui termostat.

Cînd temperatura apei este la limita superioară, circuitul urmează calea *F—RF—VTH—R—RE*. Răcitorul *RF* este un radiator schimbător de căldură apă-aer, asupra căruia se suflă aerul de la grupul motoventilator al motoarelor de tracțiune.

Instalația mai cuprinde o serie de vane și robinete care permit umplerea sau golirea apei și izolarea blocului ignitron în caz de intervenție la circuitul de apă.

Întreg ansamblul instalației de răcire, exclusiv răcitorul, este grupat în așa-numitul „bloc de apă".

Datele constructive ale sistemului de răcire cu apă a ansamblului ignitroanelor (patru blocuri a două ignitroane fiecare) la unele locomotive $B_0—B_0$ sînt următoarele:

— temperatura pereților tubului . . . . . 45°C,
— cantitatea totală de apă în instalație . . . 100 l,
— puterea electromotorului trifazat de antrenare a pompei . . . . . 1,5 CP,
— debitul pompei . . . . . 150 l/min,
— presiunea . . . . . 10 m $H_2O$.

Pentru siguranță, în caz de defectare a electromotorului trifazat de antrenare sau în cazul opririlor prelungite ale locomotivei, pe axul motopompei se prevede încă un motor de curent continuu de 0,5 CP alimentat de la baterie (72 V) și capabil să antreneze grupul la 1/2 turație.

### 4.6.6. Parametrii cîtorva tuburi ignitronice folosite pe locomotive

*a*) Ignitron tip *ESW*:

— tensiune nominală . . . . . 800 V
— intensitate nominală . . . . . 800 A
— intensitate maximă, timp de 1 min . . . 1400 A

*b*) Ignitroane *SW*, tip *SET* (utilizate pe locomotivele $B_0—B_0$ seria 12 000, S.N.C.F.). Parametrii de bază pentru două tuburi sînt următori:

— puterea în regim continuu . . . . . 640 kW;
— puterea în regim uniorar . . . . . 702 kW;
— puterea la suprasarcină, timp de 1 min . . 876 kW;
— intensitatea în regim continuu . . . . . 1000 A;
— intensitatea la demaraj, timp de 1 min . . 1500 . . 1300 A.

Date constructive:

— diametrul tubului . . . . . 225 mm;
— greutatea unui tub . . . . . 36 kg;
— greutatea ansamblului de patru blocuri ignitronice a două tuburi pentru fiecare bloc, inclusiv sistemul de excitație, sistemul de răcire, conducte și racorduri . . . . . cca 1 800 kg;
— spațiul ocupat de un agregat de patru blocuri ignitronice complete . . . . . 3 $m^3$ (3 $m^2$ suprafața × 1 m înălțime).

## Capitolul 5

# LOCOMOTIVE ELECTRICE DE CURENT ALTERNATIV MONOFAZAT, FRECVENȚA INDUSTRIALĂ (50 Hz), TENSIUNE 25 KV (LA PANTOGRAF), CU REDRESOARE STATICE SEMICONDUCTOARE-DIODE

## 5.1. SCHEMA CIRCUITULUI PRINCIPAL DE FORȚĂ

În figura 5.1 s-a reprezentat schema de principiu a circuitului principal de forță la aceste tipuri de locomotive, care de altminteri este soluția aproape generalizată. După acest principiu sînt construite locomotivele de tip 060—EA și 040—EC în exploatare curentă la C.F.R. și de asemenea îl găsim aplicat la construcția locomotivelor multor administrații de cale ferată cu sistemul de electrificare în curent monofazat 50 Hz (URSS, Franța, Anglia, R. S. Cehoslovacă, R. P. Bulgaria, R. P. Ungaria).

Aparatajul și utilajul principal este specificat în legenda figurii, iar notațiile folosite (pentru familiarizare) sînt cele utilizate curent în documentația de fabricație (Intreprinderea Electroputere Craiova) și instrucțiunile de serviciu (C.F.R.).

Circuitul principal de forță se realizează prin: pantografele (*1*, *2*) care culeg curentul monofazat 50 Hz și 25 kV de la linia de contact; înfășurarea de reglare ($T_{1\cdot1}$) a transformatorului principal ($T$); graduator ($T_{3\cdot1}$); înfășurarea primară ($T_{1\cdot3}$) a transformatorului de tracțiune (una singură pentru toate grupurile redresor-motor); înfășurarea secundară ($T_{1\cdot4}$, $T_{1\cdot5}\cdots$), de fiecare grup redresor-motor cîte o înfășurare secundară individuală; puntea de redresare ($S_{1\cdot12}$, $S_{2\cdot12}\cdots$); inversorul de mers ($S_{1\cdot14}$, $S_{2\cdot14}\cdots$); motorul de tracțiune tip serie ($M_1$, $M_2\cdots$) de curent continuu (corect, de curent ondulat) cu înfășurarea sa de excitație ($E$, $F$); selful de aplatisare (16.1, 16.3$\cdots$), pentru micșorarea ondulației curentului redresat.

Tot în cadrul circuitului principal de forță mai sînt incluse și alte echipamente care își au funcțiile lor importante: separatoarele monopolare de acoperiș (*3*, *4*) prin care se izolează, la nevoie, unul din pantografe; întrerupătorul principal rapid (*6*), care asigură protecția întregii locomotive la suprasarcini și scurtcircuite; descărcătorul cu rezistență variabilă (*5*), pentru protecția locomotivei la supratensiuni; transformator de curent (*7*) pentru aparatele de măsură; returul circuitului de tracțiune se asigură prin transformatorul sugător ($T$.8) și periile de contact (17, 18$\cdots$) montate în capătul osiilor; protecția punții redresoare la suprasarcini și scurtcircuite este asigurată prin scurtcircuitor ($S_{1\cdot10}$), iar la supratensiuni prin condensator ($S_{1\cdot13}$); funcționarea motorului de tracțiune în cîmp redus este asigurată prin rezistențele de șuntare ($S_{1\cdot9\cdot1}$, $S_{1\cdot9\cdot3}$, $S_{1\cdot9\cdot4}$) care se introduc în derivație pe excitația motorului cu contactoarele de șuntare respective ($S_{1\cdot6}$, $S_{1\cdot7}$, $S_{1\cdot8}$).

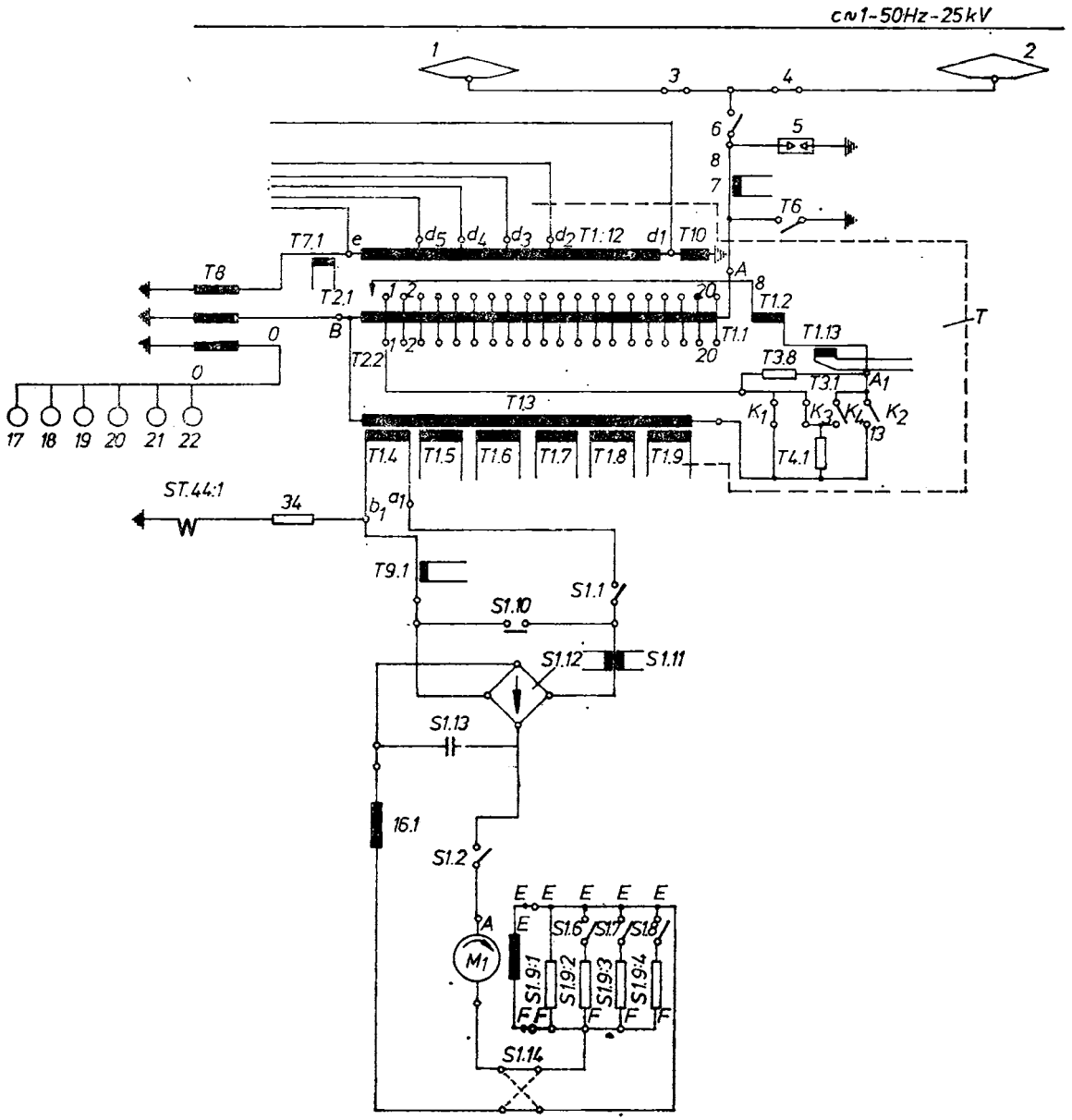



*Fig. 5.1.* Schema circuitului principal de forță la locomotivele electrice monofazate cu redresoare semiconductoare — siliciu (diode) : *1,2* — pantografe ; *3, 4* — separatoare ; *5* — descărcător de tensiune ; *6* — întrerupător automat principal ; *7* — transformator de măsură ; *8* — izolator de trecere ; $T_6$ — separator cu cuțit de punere la pământ ; $T$ — transformatorul principal ($T_{1.1}$ — înfășurarea primară de reglare — autotransformator cu prizele de tensiune 1, 2...20, $T_{1.3}$ cu $T_{1.4}$ ... $T_{1.9}$ transformatorul de tracțiune, $T_{1.12}$ — transformatorul de încălzire și servicii auxiliare) ; $T_{3.1}$ — graduator ($T_{2.1}$, $T_{2.2}$ — culegătoarele de înaltă tensiune, $K_1 \cdot \cdot K_4$ contactoare de sarcină, $T_{4.1}$ — rezistență de trecere, $T_{3.8}$ — rezistență de protecție, stingerea scînteilor, pentru culegătoarele $T_{8.1}$ și $T_{2.2}$, $T_{1.2}$ — transformator auxiliar ; $T_{1.13}$ — transformator de curent pentru protecția transformatorului $T_{1.2}$) ; $S_{1.12}$, $S_{2.12}$ ... — redresor ; $S_{1.10}$, $S_{2.10}$ ... — scurtcircuitor ; $S_{1.13}$, $S_{2.13}$ ... — condensator ; $T_{9.1}$, $T_{9.2}$ ... — transformator de măsură $S_{1.2}$, $S_{2.2}$ ... — contactor de linie ; $M_1$, $M_2$ ... — motor de tracțiune ($E$, $F$ — înfășurarea de excitație serie) ; $S_{1.9:1}$, $S_{2.9:1}$ ... — șunt permanent al excitației ; $S_{1.6}$, $S_{1.7}$ $S_{1.8}$ cu $D_{2.6}$, $S_{2.7}$, $S_{2.8}$ ... — contactoare pentru șuntare ; $S_{1.9:2}$, $S_{1.9:3}$, $S_{1.9\,4}$ cu $S_{2.9:1}$, $S_{2.9:2}$, $S_{2.9:4}$ ... — rezistente de șuntare ; $S_{1.14}$, $S_{2.14}$ ... — inversor de mers ; $T_8$ — transformator sugător și perii de contact 17, 18,... la osii pentru returul curentului de tracțiune.

În schema din figura 5.1 s-a prezentat, pentru simplificare, numai conectarea primului motor de tracțiune. Motoarele *2*, *3* și *4* în cazul unei locomotive $B_0—B_0$, sau *2—3—4—5* și *6* în cazul unei locomotive $C_0—C_0$ se conectează în mod identic, folosindu-se același echipament. Soluția prezentată, cu blocuri separate pentru fiecare motor de tracțiune (secundar transformator — redresor — self de aplatisare — motor de tracțiune — inversor de mers), este foarte agreată în exploatare întrucît conferă avantajul că în ipoteza avarierii unui motor de tracțiune sau redresor, se izolează întregul bloc, restul motoarelor putînd rămîne în funcțiune, bineînțeles cu diminuarea corespunzătoare a puterii locomotivei.

## 5.2. REDRESAREA MONOFAZATĂ PE LOCOMOTIVE

Progresul tehnic actual în domeniul semiconductoarelor-siliciu, a determinat folosirea diodelor de mare putere, ca soluție exclusivă pentru redresoarele de pe locomotivele de curent monofazat.

5.2.1. **Noțiuni recapitulative din fizica semiconductoarelor.** În electricitatea clasică se vorbea de corpuri mai mult sau mai puțin conducătoare și de corpuri mai mult sau mai puțin izolante. Fizica modernă mai introduce între aceste două categorii și corpuri de tranziție, denumite semiconductoare. Un semiconductor se definește ca „materialul cu conductivitate electronică, avînd o rezistență cuprinsă între cea a metalelor și cea a izolanților, în care concentrația purtătorilor de sarcină crește cu temperatura" (definiție conform STAS 6360—61).

Corpurile conductoare prezintă rezistivități de ordinul $10^{-6}\Omega/cm^2/cm$, cele izolante au rezistivitatea de ordinul $10^6\Omega/cm^2/cm$, iar semiconductoarele se situează între ele, avînd rezistivitatea cuprinsă între cîteva sute și cîteva zecimi de $\Omega/cm^2/cm$. Pînă în prezent, dintre corpurile semiconductoare, germaniul și siliciul au permis realizarea redresoarelor de mare putere, tehnica industrială actuală fiind axată în special pe semiconductorul de siliciu.

Se reamintește că un atom este constituit dintr-un nucleu, încărcat pozitiv din punct de vedere electric, și dintr-un număr de electroni cu sarcină electrică negativă, care gravitează în jurul nucleului pe diverse orbite. Electronii mai apropiați sînt strîns legați de nucleu, iar cei mai depărtați, care au legături mai slabe de nucleu, sînt denumiți electroni de valență. Totalitatea electronilor periferici ai unui nucleu alcătuiește numărul atomic $Z$ care diferă de la corp la corp, constituind criteriul de clasificare periodică a elementelor în tabloul lui Mendeleev.

Atomul de siliciu ($Z = 14$) are 14 electroni periferici din care 10 strîns legați de nucleu (în așa-zise locașuri interne) și 4 electroni de valență. În tabelul lui Mendeleev siliciul aparține grupei a IV-a. Toți electronii de valență sînt corelați și legați în perechi stabile și deci nu sînt disponibili electroni liberi care să poată asigura fenomenul de conducție. Datorită acestui fapt un cristal pur de siliciu este un izolant.

Conform teoriilor moderne din mecanica cuantică, din punct de vedere energetic, electronii dintr-un atom, se situează pe anumite niveluri (spectre) de energie. Dacă dintr-o cauză externă (de exemplu, o radiație luminoasă)

se comunică unui electron o anumită energie, el poate trece de pe un nivel de energie inferior pe un alt nivel superior, trecere care are loc cu absorbția unei anumite cantități de energie în atom. Trecerea inversă de la un nivel de energie superior pe unul inferior, are loc cu o emisie de energie.

În cazul unui metal, există electroni care au un oarecare grad de libertate și sub influența unui cîmp electric se mișcă printre atomi — constituind un curent electric — aceștia denumindu-se electroni de conducție. Nivelurile de energie corespunzătoare electronilor de conducție alcătuiesc un ansamblu denumit bandă de conducție. În mod analog și electronilor de valență le corespunde un ansamblu de niveluri de energie, constituind banda de valență.

În mod sugestiv, spectrele de energie pentru un conductor, un semiconductor și un izolant se pot reprezenta ca în figura 5.2.

În interiorul unei benzi, un electron se poate deplasa relativ ușor și nu reclamă decît un consum mic de energie. În schimb pentru trecerea de la o

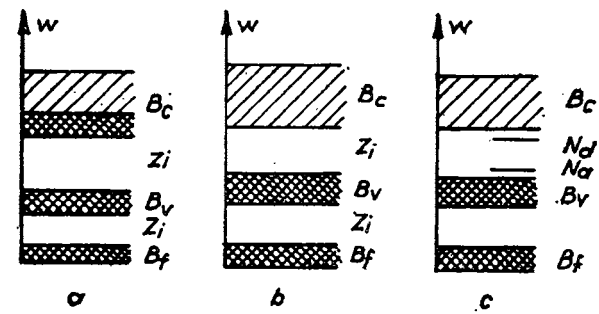



*Fig. 5.2.* Reprezentarea schematică a spectrelor energetice din atomii diverselor corpuri: *a* — conductor; *b* — izolant; *c* — semiconductor; $B_f$ — bandă fundamentală; $B_v$ — bandă de valență; $B_c$ — bandă de conducție; $Z_i$ — zonă interzisă; $N_d$ — nivel donor; $N_a$ — nivel acceptor.

bandă la alta, de exemplu de la $B_f$ la $B_v$ sau de la $B_v$ la $B_c$, este necesară o cantitate incomensurabilă de energie, motiv pentru care zona dintre benzi $Z_i$ este denumită interzisă.

Pe un nivel de energie nu pot exista mai mult de doi electroni *(principiul lui Pauli)* datorită cărui fapt în schema spectrelor de energie apar noțiunile de bandă complet ocupată, bandă incomplet ocupată și bandă neocupată. În figura 5.2, benzile cu două hașuri sînt cele ocupate, iar cele cu o hașură, benzile neocupate.

În cazul unui conductor (fig. 5.2, *a*) dacă i se aplică un cîmp electric, electronii din banda de conducție $B_c$ pot trece de pe un nivel de energie inferior pe altul superior, realizîndu-se astfel curentul electric. Treceri de electroni din benzile $B_f$ și $B_v$ în banda $B_c$ nu sînt posibile.

În cazul unui izolant (fig. 5.2, *b*), benzile $B_f$ și $B_v$ sînt complet ocupate, iar banda de conducție $B_c$ neocupată. Aplicînd un cîmp electric, nici un electron nu are posibilitatea să ajungă la banda de conducție și în consecință nu poate să apară un curent electric.

În ceea ce privește un semiconductor, este de menționat că atunci cînd este riguros pur, din punctul de vedere al conducției curentului electric el se comportă ca și un izolant.

Cînd cristalele unui semiconductor prezintă anumite impurități (conținut de atomi străini), acestea au drept efect introducerea unor niveluri supli-

mentare de energie între banda de valență $B_v$ ocupată și banda de conducție $B_c$ neocupată. Dacă în cristalul semiconductorului se introduc anumiți atomi de impurități, nivelurile energetice create suplimentar pot fi de așa-zisul tip „donor" sau tip „acceptor" (fig. 5.2, *c*). Nivelul donor $N_d$ se plasează sub banda de conducție și în imediata ei apropiere. Nivelul acceptor $N_a$ se plasează deasupra benzii de valență și de asemenea în imediata ei apropiere.

Un nivel donor — după cum arată denumirea — poate da electroni care trec în banda de conducție apropiată constituind o conducție prin electroni. Întrucît electronii sînt sarcini electrice negative, conducția se denumește de tip *n*, iar semiconductorul astfel creat este de tip *n*. Un nivel acceptor — după cum de asemenea arată denumirea — poate primi electroni din banda de valență apropiată. Cînd un electron părăsește banda de valență și trece pe nivelul acceptor, rămîne un gol în banda de valență, echivalent cu o sarcină pozitivă, și un alt electron din banda de valență se deplasează pentru a-i lua locul; la fel se întîmplă și cu acest al doilea electron și așa mai departe. Deplasarea imaginară succesivă a acestor goluri constituie o conducție prin goluri și întrucît golurile se consideră ca purtătoare de sarcini pozitive, conducția și respectiv semiconductorul astfel create sînt de tip *p*. Așadar, prin impurificarea elementului semiconductor pur, se poate varia concentrația de electroni liberi (*n*) și concentrația de goluri (*p*). Introducînd, de exemplu, în rețeaua de siliciu pur, un atom de stibiu (Sb), care face parte din grupa a V-a și deci are cinci electroni de valență, înseamnă că patru din electronii săi de valență își găsesc legături față de cei patru electroni vecini de siliciu, iar al cincilea electron de valență este „donat" în rețea și poate trece pe un alt nivel superior. În acest caz stibiul acționează ca un donor realizîndu-se conducția prin electroni de tip *n* (așa-numita zonă *N*). Pentru fiecare atom de stibiu rezultînd un electron donat de conducție, rezultă că conducția cristalului de siliciu va crește cu numărul atomilor de stibiu.

Introducînd în rețeaua de siliciu, de astă dată, un atom de exemplu de aluminiu (Al), care face parte din grupa a III-a și care are numai trei electroni de valență, rămîne neocupată una din legăturile pereche spre atomul vecin de siliciu, creîndu-se un gol, care va fi umplut de un electron de pe un nivel de energie inferior. Locul gol lăsat de acest din urmă electron va fi ocupat de un altul ș.a.m.d. Atomul de aluminiu acționează în acest caz ca un acceptor rezultînd conducția și respectiv semiconductorul de tip *p* (zona *P*).

Ansamblul constituit din zona „*p*", zona pură (pastila de siliciu), care constituie zona sau stratul de separație „*s*" și zona „*n*" constituie așa-numita joncțiune *pn* și formează elementul de bază al unui redresor semiconductor-siliciu.

Într-o joncțiune *pn*, chiar la temperaturi normale, au loc anumite procese electronice care produc un fenomen de difuzie caracterizat prin emigrarea electronilor liberi din zona *n* spre zona *p* și de goluri din zona *p* spre zona *n*, iar efectul final este apariția unei diferențe de potențial $\Delta U$ care creează un baraj în stratul joncțiunii ce împiedică continuarea difuziei. În figura 5.3, *a*, s-a reprezentat schematic o joncțiune *pn* și variația potențialului $\Delta U$ în strat.

Dacă se aplică joncțiunii *pn* o tensiune continuă exterioară cu polaritatea ca în figura 5.3, *b*(— la *p* și + la *n*) se va obține o îmbogățire cu electroni a stratului *p* și cu goluri a stratului *n*. Făcînd aproximația că rezistența circuitului în care acționează tensiunea $U_i$, inclusiv a zonelor *p*, *n*, este nulă

(aproximație practică aproape de realitate) se va produce o amplificare a barajului, ca în diagrama din figura 5.3, *b* ($\Delta U$ — diferența de potențial inițială; $U_i$ — tensiunea externă aplicată; $\Delta U'$ — diferența de potențial amplificată a barajului rezultată prin însumarea celor două curbe). Tensiunea $U_i$ aplicată este denumită tensiune inversă, iar joncțiunea *pn* este practic în stare blocată (nu este posibilă mișcarea electronilor și golurilor); zona *p* fiind foarte săracă în electroni liberi, circulația acestora către zona *n*

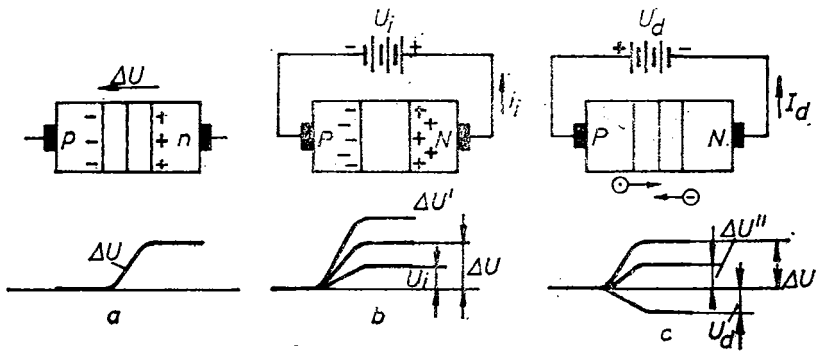



*Fig. 5.3.* Schemele unei joncțiuni *p n*: *a* — reprezentare schematică și variația potențialului în stratul de separație; *b* — joncțiune *pn* în stare blocată; *c* — joncțiune *pn* în stare de conducție.

va fi neînsemnată și va provoca nașterea unui curent extrem de mic $i_i$, denumit curent invers.

Dacă se aplică joncțiunii *pn* o tensiune externă $U_d$ cu polaritatea ca în figura 5.3, *c* (+ la *p* și — la *n*), fenomenele se petrec invers decît în cazul precedent, cu efectul micșorării (anihilării chiar) diferenței de potențial $\Delta U$ de baraj; curbele $U_d$ și $\Delta U$ se scad și rezultă curba $\Delta U'' < \Delta U$ (fig. 5.3, *c*). Zona *p*, bogată în goluri, va permite trecerea acestora către zone *n* (săracă în goluri), iar electronii din zona *n* vor circula (vor fi respinși) spre zona *p*, întrucît zona *n* este polarizată negativ, iar zona *p* la potențial pozitiv. Această circulație de electroni liberi și goluri dă naștere unui curent $I_d$ (curent direct), care crește exponențial cu tensiunea $U_d$ aplicată. Tensiunea $U_d$ este denumită tensiune directă, iar joncțiunea *pn* în această situație este în stare de conducție.

5.2.2. **Caracteristicile curent — tensiune** (caracteristica volt-amperică). Pentru un redresor semiconductor, curbele curent-tensiune, pentru unul și celălalt sens al tensiunii aplicate, reprezintă unul din parametrii de bază.

Figura 5.4, *a* reprezintă așa-numita caracteristică directă și ea dă valoarea căderii de tensiune internă ($U_d$) a celulei în funcție de curentul ce o traversează ($I_d$). Curentul crește încet și exponențial la început și apoi caracteristica devine o dreaptă. Tensiunea corespunzătoare cotului curbei este denumită „tensiune de prag" ($U_s$).

Caracteristica directă arată că, la aplicarea unei tensiuni directe, curentul ia valori mari de ordinul sute amperi, cu o cădere de tensiune în joncțiune de ordinul 1—1,2 V, adică în mod practic întreaga tensiune a sursei se aplică sarcinii.

Figura 5.4, *b* reprezintă caracteristica inversă și ea arată creșterea curentului invers în funcție de tensiunea inversă; curentul invers ($i_i$) crește foarte încet, practic neglijabil, pînă la o valoare a tensiunii zisă de avalanșe ($U_a$) sau de clacaj (tensiunea *Zener)* cînd curentul invers crește brusc, joncțiunea atinge temperaturi inadmisibile și celula clachează (se distruge). În serviciu

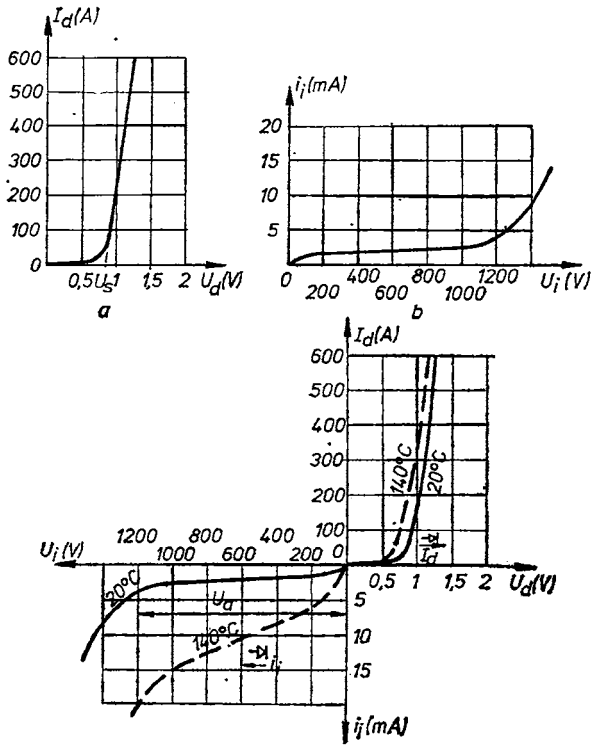



*Fig. 5.4.* Caracteristicile volt-amperice ale unui redresor semiconductor siliciu: *a* — caracteristica directă; *b* — caracteristica inversă; *c* — caracteristica unei celule de siliciu (combinată).

normal de exploatare, o celulă redresoare trebuie ținută departe de această tensiune inversă de vîrf de clacaj.

În mod curent, caracteristicile directă și inversă se prezintă reunite într-o singură curbă (fig. 5.4, *c*).

După cum se știe conductivitatea intrinsecă a unui redresor semiconductor crește exponențial cu temperatura, ceea ce modifică și caracteristica directă și inversă (curbele trasate punctat pe fig. 5.4, *c* pentru 20°C și respectiv 140°C).

Valorile indicate pentru mărimile respective din figura 5.4 corespund diodelor de mare putere și dau imaginea fizică a fenomenului redresării, respectiv îndeplinirea de către joncțiunea *pn* a condițiilor cerute unui redresor. Adică, aplicînd unei joncțiuni *pn* o tensiune alternativă, pentru semialternanța pozitivă (tensiunea pe zona *p* mai mare decît pe zona *n*) prin joncțiune trece un curent $I_d$ mare, iar pentru semialternanța negativă (tensiunea se aplică invers) prin joncțiune trece numai un curent invers ($i_i$) de valoare practic nulă; de aici și denumirea joncțiunii de supapă sau ventil electronic (dă drumul la curent numai într-un singur sens).

5.2.3. **Realizarea diodelor de siliciu de mare putere.** Elementul de bază în realizarea unei celule de redresare cu siliciu îl constituie joncțiunea *p—n*, care se obține prin difuziunea unui corp acceptor și a unui corp donor într-o pastilă de siliciu monocristalin de înaltă puritate. Pastila trebuie să prezinte suprafețe deosebit de îngrijite, ca să poată rezulta o joncțiune omogenă.

Fazele principale pentru realizarea unei diode sînt:
— obținerea monocristalului pur de siliciu;
— decuparea pastilei de monocristal;
— tratarea suprafeței;
— realizarea joncțiunii.

Joncțiunile terminate se capsulează, se încearcă, se triază și apoi se asamblează în celula redresoare. Tehnologia de fabricație comportă operații de laborator dificile și reclamă un utilaj special.

*a*) *Obținerea monocristalului pur de siliciu* este una din fazele de fabricație cele mai dificile.

Într-un creuzet de cuarț se pune o cantitate de siliciu policristalin extrapur (99,999999 %) care totdeauna conține urme de bor și deci este de tip *p*, la care se adaugă un corp donor de tip *n*. Creuzetul se închide ermetic într-o atmosferă gazoasă neutră, pentru a fi protejat contra impurităților agenților exteriori și se aduce la temperatura de fuziune a siliciului (1 500°C), utilizînd un generator de inducție prin curenți de înaltă frecvență. Cînd fuziunea totală este obținută, începe operația riguros controlată de cristalizare, în care scop se cufundă în baie un germen (sămînță) monocristalin. Un dispozitiv mecanic special de înaltă precizie ridică vertical germenul monocristal, imprimînd în același timp o mișcare de rotație care ajută la buna omogenizare a produsului.

Germenul antrenează siliciul care, sustras acțiunii de inducție a curentului de înaltă frecvență, se răcește și cristalizează. Deplasarea trebuie să fie evident foarte regulată pentru a nu perturba cristalizarea, iar temperatura băii, extrem de riguroasă, neadmițîndu-se variații mai mari de 1/10°C și aceasta la temperatura de 1 500°C. Temperatura constantă este asigurată printr-un regulator înregistrator care comandă direct curentul de control al generatorului de înaltă frecvență. Odată terminată această operație de „tragere" se obține monocristalul de formă cilindrică, avînd culoare cenușiu-metalic. Capătul de sus al cilindrului monocristal, astfel obținut, se retează și constituie germenul unei alte operații de tragere; capătul de jos care riscă să prezinte un conținut mare de impurități de asemenea se retează și se înlătură .

*b*) *Decuparea.* Din cilindrul monocristal se taie plăcuțe de grosimi mici (de ordinul a cîtorva zecimi de mm) cu ajutorul unui fierăstrău circular cu pînză de diamant, complet automatizat. Plăcuțele astfel obținute se supun unui procedeu de rodaj, care are drept scop eliminarea rizurilor și a proeminențelor lăsate în timpul tăierii. Decuparea pastilelor de siliciu, la un diametru exact, se obține cu ajutorul unui poanson special care primește mișcare intrînd în rezonanță cu un generator ultrasonic. Tăierea propriu-zisă se efectuează printr-un jet de lichid abraziv transmis în jurul capului poansonului. În acest mod plăcuța de siliciu nu este supusă nici unui efort mecanic.

*c*) *Tratarea suprafețelor.* Pastilele de siliciu obținute ca mai sus au suprafețele perturbate prin acțiunea fierăstrăului și nu sînt încă proprii fabricației joncțiunii. Ele se supun unui tratament chimic în băi cu acid fluorhidric și nitric care atacă siliciul cu o viteză ce depinde de concentrația lor. Timpul de

îmbăiere este controlat riguros pentru a nu se depăși profunzimea de atac dorită. Apoi se spală cu soluții neutralizante și apă dezionizată.

*d) Realizarea unei diode.* Pentru realizarea practică a unei diode este necesar a fi asamblate succesiv următoarele elemente: un electrod inferior (catodul), o placă de sudură, o pastilă de siliciu, o pastilă de corp (donor), un electrod superior (anodul), o placă de sudură, un racord metalic flexibil al anodului. Metalul din care sînt confecționați electrozii se alege cu multă grijă, întrucît nu trebuie să modifice starea siliciului sau a elementului donor. Rezistivitatea metalului trebuie să fie mică, iar coeficientul de dilatație apropiat de cel al siliciului, pentru a evita producerea unor contracții mecanice în ciclurile repetate de încălzire și de răcire, contracții care ar putea conduce la dislocarea joncțiunii. Asamblarea succesivă a elementelor necesită un utilaj special și se desfășoară după procese tehnologice destul de dificile, în care scop se prevăd niște creuzete de grafit pur, care se încarcă cu elementele de asamblat, se plasează într-un vid înaintat, se supun unui ciclu de temperaturi bine controlate (de ordinul a 1 000 °C) pentru realizarea sudurilor astfel ca să nu preseze pastilele, realizîndu-se etanșări îngrijite. Faza finală a fabricației este capsularea, adică plasarea joncțiunii la adăpost de aer și de medii corosive. O secțiune schematică printr-o diodă de siliciu, cu evidențierea elementelor constructive, este prezentată în figura 5.5.

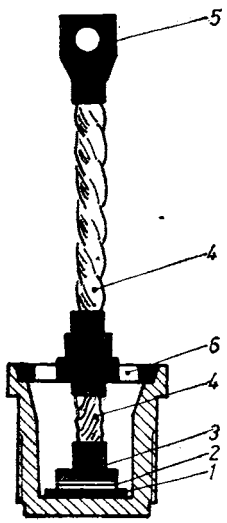



*Fig. 5.5.* Secțiune schematică printr-o diodă de siliciu: *1* — electrod inferior; *2* — joncțiunea *pn*; *3* — electrod superior; *4* — cablu flexibil; *5* — papuc; *6* — traversare izolantă; *7* — capsulă metalică.

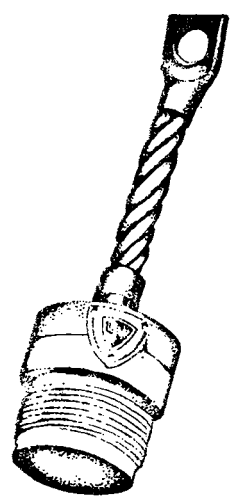


*Fig. 5.6.* Vedere de ansamblu a unei diode de siliciu.

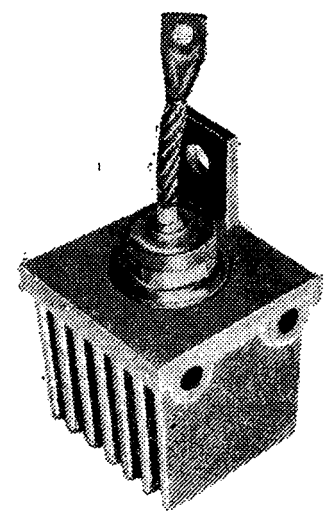


*Fig. 5.7.* Diodă de siliciu montată pe radiatorul său.

În figura 5.6 se poate vedea aspectul general al unei diode de siliciu de mare putere; la partea inferioară, capsula cilindrică se filetează pentru a putea fi înșurubată la propriul ei radiator cu aripioare (fig. 5.7).

## 5.3. PARAMETRII PRINCIPALI AI UNEI DIODE

Pentru utilizarea diodelor în scopul alcătuirii instalațiilor de redresare, este necesar a fi cunoscuți anumiți parametri de definire. De regulă valorile indicate de furnizor ca parametri sînt date ca valori limită, adică nu trebuie depășite pentru nici o diodă în condițiile cele mai grele de exploatare.

*Curent direct de vîrf* ($I_{dv}$) este definit ca valoarea amplitudinii ce parcurge dioda în sens direct în regim permanent (fig. 5.8).

*Curent mediu redresat* ($I_d$) este valoarea medie calculată pe o perioadă; o celulă zisă de 200 A ($I_d$ pentru o perioadă) este străbătută de 400 A în timpul unei semiperioade ($I_{dv}$), iar semiperioada următoare de un curent zero. Această precizare la definire este foarte importantă întrucît aceeași celulă poate fi clasată de, 400 sau 200 A după cum valoarea medie este calculată pentru o semiperioadă sau o perioadă. Adesea cataloagele de diode nu specifică acest lucru; în acest caz se ia, drept curent mediu redresat, valoarea curentului direct (corespunzător lui $T/2$) indicat de catalog împărțit la 2 (deci pentru $T$).

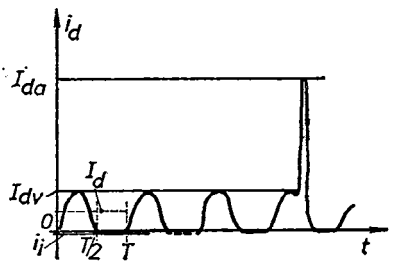



*Fig. 5.8.* Reprezentarea schematică a curenților într-o diodă.

*Curent invers* ($i_i$) este cel ce străbate dioda cînd o tensiune inversă specificată este aplicată (în perioada cînd dioda nu conduce, adică pe semialternanța negativă).

*Curent direct de vîrf de suprasarcină accidentală* ($I_{da}$) este impulsul de curent pentru o scurtă durată (de ordinul ms); de obicei este vorba de curentul de suprasarcină ce poate fi suportat în regim de scurtcircuit.

*Tensiunea directă de vîrf* ($U_{dv}$) este valoarea amplitudinii unei tensiuni de formă sinusoidală cu frecvența 50 Hz, obținută la bornele diodei în regim permanent la trecerea curentului direct de vîrf (fig. 5.9); este vorba de căderea de tensiune în diodă care este de ordinul 1...1,5 V la trecerea curentului $I_{dv}$.

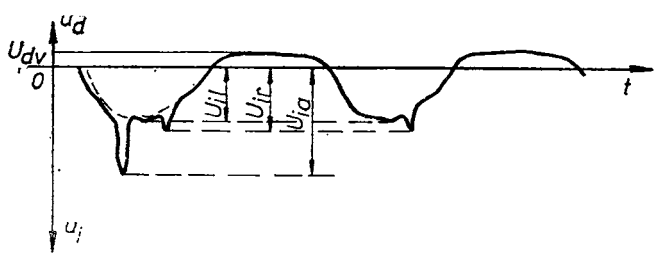



*Fig. 5.9.* Reprezentarea schematică a tensiunilor pe diodă.

*Tensiunea inversă de vîrf de lucru* ($U_{i1}$) este amplitudinea maximă ce apare periodic în timp la bornele diodei (curba trasată punctat în fig. 5.9) și care în exploatare curentă nu este admis a fi depășită. În cazul redresoarelor de pe locomotive, $U_{i1}$ corespunde pentru tensiunea nominală din linia de contact ($U_{LC}$= 25 kV); cum normele admit limita maximă de variație a tensiunii în linia de contact la $U_{LC}$ = 27,5 kV, pentru calcule de dimensionare

a redresoarelor tensiunea inversă de lucru se va lua $U'_{i1} = K_{st}U_{i1}$, unde $K_{st}$ este coeficient de supratensiune avînd valoarea $K_{st} = \frac{27,5}{25} = 1,1$.

*Tensiunea inversă repetitivă ($U_{ir}$)* este amplitudinea maximă incluzînd şi tensiunile tranzitorii (în special datorate fenomenului de comutaţie din celulă).

*Tensiunea inversă de vîrf de suprasarcină accidentală ($U_{ia}$)* reprezintă valoarea instantanee cea mai ridicată a tensiunii inverse tranzitorii nerepetitive. În mod practic ea este echivalentă cu tensiunea de avalanşe ($U_a$ — fig. 5.4). În cazul cînd în catalog nu se indică în mod expres tensiunea inversă de lucru ea se poate lua $0,4 \times U_{ia}$.

În tabelul 5.1 s-au indicat parametrii necesari elementelor de calcul ale unora dintre diodele de siliciu de mare putere folosite pe locomotive electrice (dioda *TU*-38 se fabrică în ţară de IPRS-Băneasa şi este utilizată pentru redresorul LE-060-EA din parcul CFR).

*Tabelul 5.1*

**Parametrii unor diode folosite pe locomotive electrice**

| Parametrul | Simbol | Unit. măs. | Tip diodă furnizor | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | TU-38 IPRS Băneasa | Si-12B SW * | Si-$B_{300}$ ASEA * | Si-$A_{250}$ ASEA |
| Curent mediu redresat | $I_d$ | A | 350 | 200 | 350 | 300 |
| Curent direct de vîrf de suprasarcină accidentală (10 ms) | $I_{da}$ | A | 55000 (la $t_c$=25°C) | — | 6000 (la $t_c$ = 100°C) | 4800 (la $t_c$= 100°C) |
| Tensiune inversă de vîrf lucru | $U_{ivl}$ | V | 1300 | 480 | 600 | 600 |
| Tensiune inversă de vîrf repetitivă | $U_{ivr}$ | V | 1300 | — | 1000 | 1000 |
| Tensiune inversă de vîrf de suprasarcină accidentală | $U_{iva}$ | V | 1800 | 1200 | 1500 | 1500 |

* SW — Schnedier/Westinghouse (Franţa)
ASEA — Suedia
$t_c$ — temperatura capsulei.

Tehnica actuală, îndeosebi în domeniul puterilor mari, este axată aproape exclusiv pe fabricaţie, chiar industrială, a redresoarelor semiconductoare cu siliciu. Această tendinţă este justificată datorită avantajelor pe care le prezintă acest tip de redresor faţă de celelalte redresoare semiconductoare realizate în practică.

O comparaţie între diversele caracteristici tehnice mai importante ale redresoarelor semiconductoare mai cunoscute se poate face cu ajutorul datelor din tabelul 5.2.

Din examinarea acestui tabel se deduc următoarele avantaje mai importante pentru redresorul de siliciu:

— tensiunea inversă se situează foarte sus, ceea ce arată că se poate acoperi orice domeniu de alimentare cu unul sau mai multe elemente în serie;

*Tabelul 5.2*

**Datele caracteristice ale unor tipuri de redresoare semiconductoare**

| Redresorul-caracteristici | Unitatea de măsură | Cupru-oxid ($Cu_2O$) | Seleniu (Se) | Germaniu (Ge) | Siliciu (Si) | Observații |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Densitate de curent | $A/cm^2$ | 0,14 | 0,20 | 100 | 200 | Ventilare forțată |
| Tensiune inversă, valoare eficace | V | 6 | 25 | 110 | 380 | — |
| Temperatura maximă de serviciu peste 35°C | ,C | 50 | 85 | 65 | 140 | Ventilare forțată |
| Randament pe celulă | % | 72 | 92 | 98,5 | 99,6 | |
| Spațiu necesar, relativ la aceeași putere, raportat la redresorul cu Si | — | 30 | 15 | 14 | 1 | — |

— randamentul foarte ridicat, ceea ce îl face apt la puteri mari;

— densitatea mare de curent, ceea ce conduce la dimensiuni și greutăți mici;

— temperatura de serviciu foarte ridicată, avînd drept urmare eliminarea pierderilor prin simplă răcire cu aer.

În legătură cu randamentul redresorului de siliciu se menționează că pierderile, care îl determină, sînt date de trecerea curentului invers în timpul semiperioadei de blocaj și de căderea de tensiune directă în timpul fazei active de conducție. Curentul invers are valoare extrem de mică în raport cu valoarea curentului nominal și deci pierderile sînt practic neglijabile, iar căderea de tensiune directă fiind de ordinul a 1 ... 1,2 V și variind puțin cu sarcina, pierderile corespunzătoare sînt de ordinul a 1%. În figura 5.10 s-a reprezentat variația randamentului cu sarcina pentru semiconductoarele uzuale.

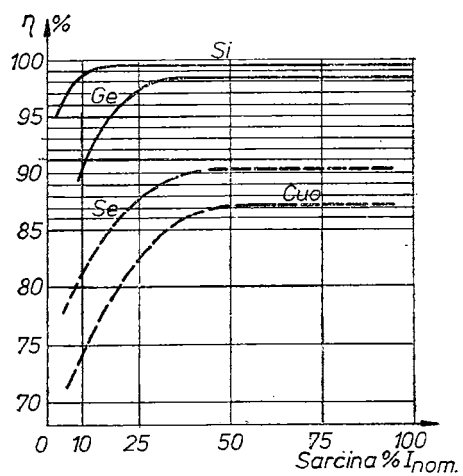



*Fig. 5.10.* Randamentul semiconductorilor uzuali.

## 5.4. LEGAREA ÎN SERIE ȘI ÎN PARALEL A DIODELOR

În diversele domenii de aplicare practică a redresării cu diode semiconductoare cu siliciu (industrie, electrochimie, locomotive electrice etc.), cînd se cer parametri de tensiune și de curent ce depășesc pe cei nominali ai unei singure diode, se recurge la legarea în serie sau în paralel a unui număr necesar de elemente, după cum este nevoie de o tensiune mai mare, respectiv de un curent mai mare.

Conexiunile serie și paralel se efectuează numai cu elemente de același tip. Totuși, pentru o funcționare corectă a ansamblului trebuie să se ia unele precauții.

Deși elementele ce se conectează sînt de același tip și curentul invers este infim, acesta poate diferi de la un element la altul. Cum repartiția de tensiune este aproximativ invers proporțională cu valoarea curentului invers, rezultă că elementele cu un curent invers mai mic vor fi suprasolicitate. Pentru conexiunea serie în vederea unei repartiții de tensiune cît mai uniformă pe elemente, tensiunea inversă de vîrf de serviciu se ia în considerare scăzută cu 10% față de cea nominală a elementelor ce se conectează. De asemenea, în vederea echilibrării tensiunii pe elemente, se conectează în paralel cu elementele legate în serie o rezistență denumită rezistență de echilibrare (de ordinul kA) și care se dimensionează la un curent de circa cinci ori mai mare decît curentul maxim invers admis pe element. Schema legării diodelor în serie este prezentată în figura 5.11.

La conexiunea în paralel, datorită condițiilor elementelor ce pot diferi puțin (nu au riguros între ele aceeași caracteristică directă), în vederea unei

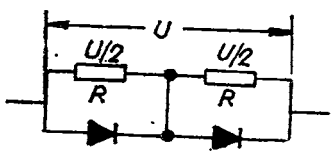



*Fig. 5.11.* Schema legării în serie a diodelor: $U_1 = U_2 = \frac{1}{2} U$; $R$ — rezistență de echilibrare.

repartiții judicioase a curenților între celule, se utilizează trei procedee pentru preluarea de sarcini egale:

— Clasificarea și alegerea extrem de atentă a celulelor. Celulele de o aceeași clasă de tensiune inversă se clasează riguros și după căderea de tensiune directă foarte apropiate (se admit abateri de 3—4 sutimi de volt). Pe un același braț de punte nu se montează în paralel decît celule din aceeași categorie, iar suma căderilor de tensiune directă trebuie să fie aceeași pe toate ramurile unui braț.

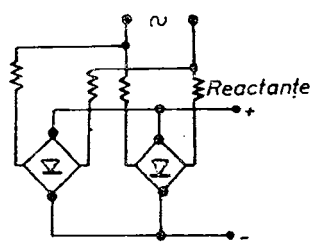



*Fig. 5.12.* Sisteme de echilibrare la legarea în paralel a punților elementare.

— Declasarea în intensitate a celulelor. Curentul care se stabilește în celula cea mai încărcată trebuie luat în calcul cel mult egal cu limita ce i se fixează pentru funcționarea în regim permanent. În mod practic, se ia în considerare o reducere a sarcinii nominale a celulei cu circa 20% și se asigură și o răcire egală la toate celulele, prevăzîndu-se în acest scop fiecare cu radiator propriu, de același tip și dimensiuni și cu răcire uniformă.

— Utilizarea de sisteme de echilibraj auxiliare. Aceste sisteme sînt diverse. În figura 5.12 este prezentată schema echilibrajului între curenții punților elementare, utilizîndu-se reactanțe fixe. În prezent asemenea sisteme de echilibrare nu se mai practică, ci în celule se sporește numărul diodelor legate în paralel prin luarea în considerare a unui coeficient de siguranță supraunitar.

## 5.5. SCHEME DE MONTAJ AL DIODELOR PE LOCOMOTIVE

La alcătuirea „redresorului monofazat" de pe locomotivă, montajul electric al diodelor trebuie astfel făcut încît să fie redresate ambele alternanțe. Schemele practice, în acest sens, pot fi în montaj *push-pull*, denumit și montajul cu punct median, sau montaj în *punte Grätz*, denumit prescurtat montaj punte (fig. 5.13).

În cazul schemei push-pull (fig. 5.13, *a*) se observă că pentru o semialternanță lucrează dioda *1* (circuitul se închide prin sarcina *S* la punctul median.

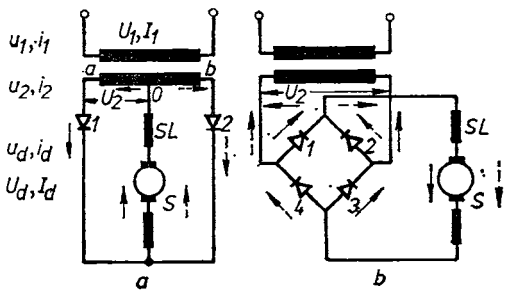



*Fig. 5.13.* Scheme de montaj al diodelor : *a* — montaj push-pull (cu punct median); *b* — montaj punte.

al înfășurării secundare a transformatorului; sensul figurat prin săgeata plină), iar pentru cealaltă semialternanță lucrează dioda *2* (circuitul se închide prin sarcina *S*, curentul circulă în același sens prin sarcina *S*, la punctul median *O*; sensul figurat prin săgeata trasată punctat).

În cazul schemei punte (fig. 5.13, *b*) modul de lucru este arătat prin săgeata plină pentru o semialternanță pozitivă (lucrează două brațe ale punții, diodele *1*+*3* polarizate în sens de conducție, iar *2* + *4* sînt polarizate în sens invers, deci blocate), iar pentru cealaltă semialternanță buclarea este indicată prin săgeata figurată cu linie întreruptă. În cele de mai jos se consideră că grupul transformator-redresor este alimentat în 50 Hz.

Pentru a putea stabili mai ușor ecuațiile redresării monofazate și în scopul reprezentării mai simple a curbelor parametrilor de intrare și ieșire, se fac următoarele notații și ipoteze simplificatoare:

— cu $u_1$, $i_1$ s-a notat variația tensiunii și curentului (valorile instantanee) în primarul transformatorului redresoric;

— $U_1$, $I_1$ — valori eficace;

— $u_2$, $i_2$, $U_2$, $I_2$ — valori instantanee, respectiv valori eficace în gol la secundarul transformatorului;

— $u_d$, $i_d$, $U_d$, $I_d$ — variația tensiunii și curentul redresat, respectiv valorile medii;

— reactanța transformatorului $X_t = x_p + x_s = 0$ ($x_p$ — reactanța primarului, $x_s$ — reactanța secundarului), ceea ce conduce la a admite o comutație instantanee (trecerea funcționării de pe o diodă pe alta, respectiv de pe brațele *1* + *3* pe *2* + *4* se face instantaneu, adică în momentul trecerii alternanței prin zero).

— se neglijează căderea de tensiune în redresor ($\Delta U_R = 0$)

— în scopul ameliorării formei curentului prin sarcina *S*, în circuitul acesteia s-a înseriat o inductanță (selful de aplatisare *SL*).

Cu notațiile și în ipotezele simplificatoare de mai sus, în figura 5.14 s-au trasat curbele de tensiune și curent în cele trei puncte caracteristice ale schemelor.

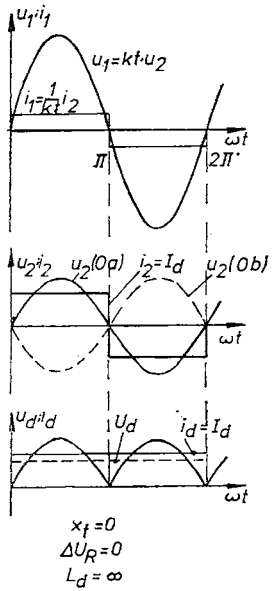



*Fig. 5.14.* Curbele de tensiune și curent, la intrare și ieșirea din redresor.

5.5.1. **Tensiunea medie redresată.** Tensiunea aplicată de la secundarul transformatorului fiind sinusoidală ($u_2 = \sqrt{2}\, U_2 \sin \omega t$) și aplicată redresorului, la ieșire valoarea instantanee și forma tensiunii redresate ($u_d$) va reprezenta o succesiune de semisinusoide pozitive.

Tensiunea medie redresată ($U_d$) rezultă:

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2}\, U_2 \sin \omega\, t \cdot \mathrm{d}\omega t =$$

$$= \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 \Big| - \cos \omega t \Big|_0^{\pi} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 \qquad (1)$$

($\sqrt{2}\, U_2$ este amplitudinea maximă a sinusoidei).

În privința curentului redresat ($i_d$), valoarea și curba de variație depinde de natura sarcinii ($S$) alimentată de redresor. În ipoteza că $S$ este o rezistență pură, forma lui $i_d$ va fi aceeași cu $u_d$. Cînd $S$ este o impedanță de valoare infinită ($L_d = \infty$), curentul redresat este complet aplatisat și deci $i_d = I_d$ (această ipoteză, pentru simplificarea reprezentării, a fost redată în fig. 5.14). Cînd $S$ este o impedanță de valoare finită (cazul alimentării unui motor de tracțiune cu o inductanță ($L$) de valoare (finită), curentul redresat are o formă intermediară între cele două rezultînd ceea ce se denumește *curent ondulat.*

Dacă se notează cu $K_t$ — raportul de transformare al transformatorului redresoric, rezultă relațiile:

$$U_1 = K_t\, U_2;\ I_1 = \frac{1}{K_t} I_2.$$

În ipoteza simplificatoare de mai sus ($L_d = \infty$) și curenții din secundar și primar sînt rectangulari.

Din punct de vedere al valorilor și curbelor tensiunii și curentului redresat ambele montaje (push-pull și punte) sînt echivalente. Pentru a aprecia care din cele două montaje este mai avantajos a fi aplicat pe locomotive trebuie examinați alți parametri (factori de schemă) ca spre exemplu: puterea de tip a transformatorului, tensiunea inversă aplicată pe diodă etc.

5.5.2. **Puterea de tip a transformatorului** ($P_T$). Aceasta este o mărime convențională, specifică transformatorului redresoric, și

se definește ca semisuma puterilor aparente la primar ($P_1$) și secundar ($P_2$):

$$P_T = \frac{P_1 + P_2}{2}. \qquad (2)$$

*În cazul montajului punte* (figura 5.13, *b*), următoarele relații pot fi scrise:

— puterea pe partea redresată · · · $P_d = U_d I_d$

— puterea aparentă la secundar · · · $P_2 = U_2 I_2 = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_d I_d = 1{,}11 P_d$

$$\left(U_2 = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_d \text{ din relația (1); } I_2 = I_d\right)$$

— puterea aparentă la primar · · · $P_1 = U_1 I_1 = K_t U_2 \cdot \frac{1}{K_t} I_2 = 1{,}11 P_s$

— rezultă puterea de tip a transformatorului · · ·

$$P_T = \frac{1{,}11 P_d + 1{,}11 P_d}{2} = 1{,}11 P_d$$

Pentru *montajul push-pull* (fig. 5.13, *a*):

— O alternanță străbate numai o jumătate (*Oa*) din înfășurarea secundarului, în care timp cealaltă jumătate (*Ob*) nu este străbătută de curent; deci jumătate din înfășurare este parcursă de curent jumătate dintr-o perioadă:

Valoarea eficace a curentului pentru întreaga înfășurare secundară va fi.

$$I_2 = \sqrt{\frac{I_d^2 \cdot \pi + 0^2 \pi}{2\pi}} = \frac{I_d}{\sqrt{2}}$$

— puterea pe partea redresată · · · · $P_d = U_d I_d$

— puterea aparentă la secundar · · · $P_2 = 2 U_2 I_2$

$$P_2 = 2 \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_d \frac{I_d}{\sqrt{2}} = \frac{\pi}{2} P_d = 1{,}57 P_d$$

($2 U_2 I_2$ fiindcă fiecare jumătate de înfășurare *oa*, *ob* are tensiunea eficace $U_2$, deci două înfășurări înseriate).

— puterea aparentă la primar · · · · · $P_1 = U_1 I_1 = 1{,}11 P_d$ (situație similară ca la montajul punte).

— rezultă puterea de tip a transformatorului · · · · · ·

$$P_T = \frac{1{,}11 P_d + 1{,}57 P_d}{2} = 1{,}34 P_d$$

Proasta utilizare a secundarului transformatorului (fiecare jumătate din înfășurare, folosită jumătate din perioadă) conduce la o supradimensionare a transformatorului, pentru același putere $P_d$ la ieșire din redresor în cazul montajului push-pull ($P_T = 1{,}34\ P_d$, față de ($P_T = 1{,}11\ P_d$), care constructiv se traduce printr-o creștere a greutății transformatorului cu 10—15% față de montajul punte. Acesta este dealtminteri și avantajul esențial al schemei de montaj punte.

5.5.3. **Tensiunea inversă.** Această tensiune se aplică între anod-catod la brațul (cazul montajului push-pull), respectiv brațele (cazul montajului punte) care nu conduc, în momentul basculării de la starea de neconducție la starea de conducție. Valoarea maximă a acestei tensiuni ($U_{imax}$) va fi amplitudinea sinusoidei de valoare eficace $U_2$ ce se aplică redresorului.

— Pentru montajul punte:

$$U_{imax} = \sqrt{2}\ U_2 = \sqrt{2}\ \frac{\pi}{2\sqrt{2}}\ U_d = \frac{\pi}{2}\ U_d \tag{3}$$

— Pentru montajul push-pull:

$$U_{imax} = 2\sqrt{2}\ U_2 = \pi\ U_d. \tag{4}$$

Tensiunea inversă maximă servind la dimensionarea redresorului, se observă că și din acest punct de vedere montajul punte este net avantajos montajului push-pull.

Avantajele menționate mai sus au condus la folosirea generalizată a schemei de montaj în punte a diodelor la realizarea redresorului pentru locomotivele monofazate. Pentru acest considerent, în cele de mai jos se va trata numai montajul punte.

## 5.6. COMUTAȚIA CURENTULUI

Considerînd cazul real cînd reactanța transformatorului are valoare finită ($X_t \neq 0$), trecerea funcționării de pe o diodă (respectiv braț) care a lucrat pe o alternanță, pe cealaltă diodă care lucrează în cealaltă alternanță, nu se mai face instantaneu (în momentul trecerii alternanței prin zero), ci trecerea curentului de pe o serie de diode pe celelalte se face într-un timp finit ($\tau$) denumit „durata de comutație a redresorului".

Dacă se exprimă durata de comutație în valoare unghiulară se obține „unghiul de comutație" $\gamma = \omega\tau$, care caracterizează fenomenul.

Datorită inductanței transformatorului ($l$), tensiunea autoindusă a transformatorului $\left(l\,\frac{di}{dt}\right)$ prelungește curentul din dioda ce a condus (scade), în timp ce crește în dioda ce intră în conducție, pe durata de comutație. Pe aceeași durată ($\gamma$) cînd toate diodele montajului conduc, echivalează cu un scurt-

circuit la diagonala de alimentare a redresorului (între punctele $CD$ — fig. 5.16) și deci tensiunea redresată este nulă (nu mai este alimentată puntea).

Tensiunile și curenții în diferitele puncte ale transformator-redresorului (montaj punte) sînt trasate în diagrama din figura 5.15, unde pentru reprezentarea simplificată rectangulară a curenților s-a făcut ipoteza simplificatoare $L_d = \infty$

*Tensiunea medie redresată* va fi:

$$U_d = \frac{1}{\pi}\int_{\gamma}^{\pi} \sqrt{2}\, U_2 \sin \omega t \cdot d\omega t =$$

$$= \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 (1 + \cos\gamma) \qquad (5)$$

și depinde de mărimea unghiului de comutație (pentru $\gamma = 0$ adică comutație instantanee se regăsește valoarea $U_d = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2$, fig. 5.14 și relația 1).

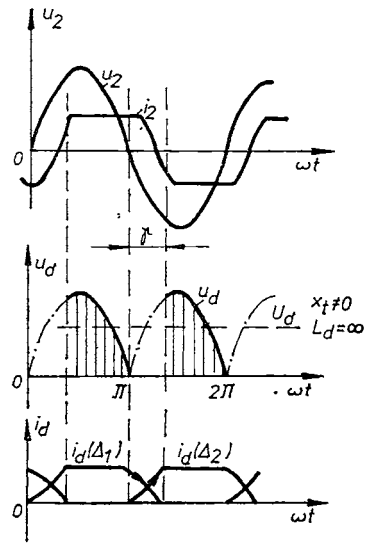



*Fig. 5.15.* Diagrama tensiunilor și curenților ținînd seamă de unghiul de comutație.

*Calculul unghiului de comutație*, în cazul montajului punte (fig. 5.16), se face pornind de la ecuația tensiunii pentru unul din circuite (bucla) $ABCED$ sau $ABCFD$:

$$e_2 - l_2 \frac{di_2}{dt} = 0, \text{ sau } -\sqrt{2}\, U_2 \sin \omega t = l_2 \frac{di_2}{dt}, \text{ de unde}$$

$$-\frac{\sqrt{2}\, U_2}{l_2} \sin \omega t \cdot dt = di_2. \qquad (6)$$

Integrînd ecuația (6) între $0 - \tau$ și cu $\gamma = \omega\tau$, rezultă

$$\cos\gamma = 1 - \frac{2 l_2 \omega I_2}{\sqrt{2}\, U_2},$$

sau, în funcție de reactanța $X_2'$ (reactanța transformatorului văzută din secundar) și $X_1'$ (reactanța transformatorului văzută din primar)

$$\cos\gamma = 1 - \frac{2X_2' I_2}{\sqrt{2}\, U_2}; \quad \cos\gamma = 1 - \frac{2X_1'}{m^2} \cdot \frac{I_2}{\sqrt{2}\, U_2}. \qquad (7)$$

Înlocuind pe $\cos\gamma$ în ecuația (5) se obține valoarea tensiunii medii redresate, în funcție de parametrii transformatorului:

$$U_d = \frac{\sqrt{2}\, U_2}{\pi}\left(2 - \frac{2X_1'}{m^2} \cdot \frac{I_2}{\sqrt{2}\, U_2}\right) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 - \frac{2X_1' I_2}{\pi m^2}. \qquad (8)$$

*Valoarea tensiunii la bornele motoarelor.* Dacă se ține seama de căderile ohmice și căderile de tensiune în redresor, în ipoteza că același redresor alimentează $n$ motoare în paralel, se obține la bornele motorului tensiunea redresată:

$$U_m = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 - \Delta U_r - \left( \frac{n}{\pi} \frac{2X_1'}{m^2} + nR_2' + R_{SL} \right) I_m. \qquad (9)$$

În relațiile de mai sus, notațiile folosite au următoarea semnificație:

$U_2$ — valoarea eficace a tensiunii secundare în gol, pentru o treaptă dată a graduatorului;

$\Delta U_r$ — căderea de tensiune în redresor;

$X_1'$ — reactanța totală a transformatorului redusă la primar; ea variază după treapta graduatorului și trebuie luată valoarea corespunzătoare aceleiași trepte pentru care s-a considerat $U_2$;

$m = \frac{U_1}{U_2}$ — raportul de transformare;

$R_2'$ — rezistența totală a transformatorului văzută din secundarul $AB$;

$R_{SL}$ — rezistența selfului de aplatisare.

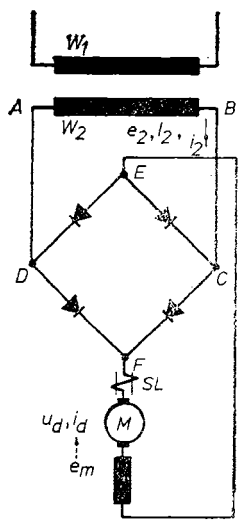



*Fig. 5.16.* Montaj punte — schema de calcul a unghiului de comutație.

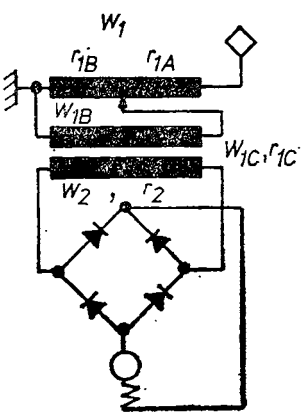



*Fig. 5.17.* Alimentarea redresorului de la un transformator cu înfășurare de reglare pe primar.

Relațiile de mai sus s-au stabilit în ipoteza unui transformator simplu cu două înfășurări (fig. 5.16) pentru cazul cînd transformatorul mai are o înfășurare de reglare-autotransformator (fig. 5.17), atunci:

$m$ — reprezintă raportul de transformare global măsurat între înfășurarea de reglare și secundarul transformatorului redresoric;

$X_1'$ — reactanța totală redusă la înfășurarea de reglare.

## 5.7. FUNCȚIONAREA PUNȚII DE REDRESARE, ALIMENTÎND UN MOTOR DE TRACȚIUNE

Motorul de tracțiune este pentru redresor o sarcină activă (dezvoltă o tensiune contraelectromotoare în timpul cît funcționează) avînd o reactanță $X_d = \omega L_d \neq 0$ de valoare finită.

Aplicînd teorema lui Kirchoff la circuitul (bucla) *FMECF* (fig. 5.16) rezultă:

$$u_d = e_m + R_d i_d + L_d \frac{di_d}{dt}, \tag{10}$$

în care s-a notat:

$e_m$ — tensiunea contraelectromotoare a motorului;
$R_d$ — rezistența ohmică echivalentă a circuitului de redresare;
$L_d$ — inductanța echivalentă a circuitului de redresare (selful de aplatisare *SL* inclusiv motorul).

Căderea de tensiune ohmică $R_d i_d$ fiind mică în raport cu $U_d$ ($R_d$ are valoare foarte mică), se poate neglija și ecuația (10) devine:

$$L_d \frac{dt_d}{di} = u_d - e_m \tag{11}$$

a cărei reprezentare grafică este dată în figura 5.18 și unde s-au făcut ipotezele $\gamma = 0$ (comutație instantanee), motorul funcționează în regim stabilizat $e_m = \text{const.}$ (reprezentare lineară), $\Delta U_{red} = 0$.

Suprafețele hașurate reprezintă tocmai tensiunea electromotoare autoindusă în circuit $\left(L_d \frac{dt_d}{di}\right)$, iar semnul suprafeței este semnul derivatei $\frac{di_d}{dt}$ ($L_d$ este constant).

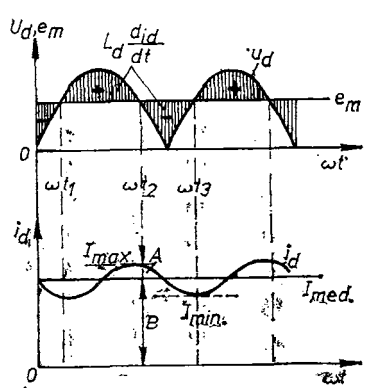



*Fig. 5.18.* Alimentarea unui motor de către redresor și producerea curentului ondulat.

Din diagrama tensiunilor se deduce diagrama curentului $i_d$ (funcția):

— în timpul cît $u_d > e_m$, $L_d \frac{di_d}{dt} > 0$ (suprafața hașurată și notată +), selful de aplatisare înmagazinează energia;

— în timpul cît $u_d < e_m$, $L_d = \frac{di_d}{dt} < 0$ (suprafața hașurată și notată —), selful cedează energia înmagazinată. Asociind fenomenul în acest mod rezultă că în ramura motorului va circula mereu un curent $i_d$ în același sens.

— în punctele de intersecție... $u_d = e_m$ și deci $L_d \frac{di_d}{dt} = 0$ (derivata se anulează) și funcția ($i_d$) va prezenta un maxim sau un minim: în momentele $\omega t_1, \omega t_3 \ldots$ funcția $i_d$ prezintă minime (derivata trece de la semn (—) la semn

(+); în momentele $\omega t_2$, $\omega t_4$ ... funcția $i_d$ prezintă maxime (derivata trece de la semn (+) la semn (—).

În concluzie curentul care trece prin motor nu este constant, *ci ondulat* (de aici și denumirea motorului care lucrează cu un asemenea curent — „motor de curent ondulat"). Din diagramă (fig. 5.18) se observă că ondulația nu depinde de curentul de sarcină ci numai de valorile $u_d$, $e_m$ și forma curbelor de variație a acestora.

Diferența $I_{max} - I_{min}$ definește ondulația absolută a curentului și aceasta influențează defavorabil funcționarea motorului în sensul că produce o supraîncălzire a acestuia și agravează comutația.

În mod curent se obișnuiește ca ondulația curentului să se exprime prin „coeficientul de ondulație ($\beta$) definit ca raportul dintre semiamplitudinea ondulației ($A$) și valoarea medie a curentului ($B$), exprimat în % din curentul nominal al motorului ($I_n$), adică:

$$\beta = \frac{A}{B} = \frac{\frac{I_{max} - I_{min}}{2}}{\frac{I_{max} + I_{min}}{2}} = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} = \%I_n. \qquad (12)$$

Cu cît ondulația curentului este mai mică, evident cu atît funcționarea motorului se ameliorează; aplatisarea totală a curentului are loc pentru $L_d = \infty$. Soluția generalizată pe locomotive (un compromis) este aceea că în circuitul motorului, în scopul măririi impedanței circuitului redresat, se introduce un self de aplatisare ($SL$) cu $L_{SL}$ de valoare finită care să conducă la un coeficient de ondulație acceptabil pentru funcționarea motorului și să rezulte dimensiuni și greutate convenabile și pentru selful de aplatisare. În plus se mai iau măsuri suplimentare constructive la motorul de tracțiune.

5.7.1. **Valoarea eficace a curentului redresat.** Curentul ondulat ($i_d$ — fig. 5.18) este rezultanta unei componente (curent) constante ($I_{med}$) peste care se suprapun curenți armonici de frecvențe crescînde și amplitudini descrescînde; armonica dominantă fiind aceea cu frecvența dublă a curentului de alimentare, adică $f = 100$ Hz. Valoarea eficace a curentului redresat ($I_{de}$) se poate calcula cu suficientă aproximație, luînd în considerare curentul mediu

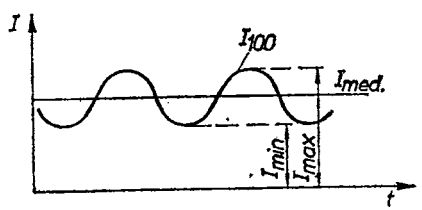



*Fig. 5.19.* Diagrama curentului mediu și armonica 100 Hz la redresoare.

($I_{med}$) și curentul armonic $i_{100}$ de frecvență 100 Hz al armonicii dominante (termenul constant și prima armonică din dezvoltarea în serie Fourier a funcției $i_d$; restul termenilor se neglijează). Această situație este reprezentată în figura 5.19.

În acest condiii:

$$I_{def} = \sqrt{I_{med}^2 + i_{100.ef}^2} \tag{13}$$

Ţinînd seamă că ondulaţia se exprimă prin:

$$\beta = \frac{I_{max} - I_{min}}{2I_{med}} = \frac{\sqrt{2}\, i_{100 \cdot ef}}{I_{med}} \tag{14}$$

(vezi relaţia (12); $I_{max} - I_{min}$ este amplitudinea sinusoidei $i_{100}$)

$i_{100 \cdot ef} = \frac{\beta}{\sqrt{2}} I_{med}$ şi relaţia (13) devine:

$$I_{d \cdot ef} = \sqrt{I_{med}^2 + \frac{\beta^2}{2} I_{med}^2} = I_{med} \sqrt{1 + \frac{\beta^2}{2}}.$$

Această expresie se mai poate scrie simplificat sub forma:

$$I_{d \cdot ef} = I_{med} \left( 1 + \frac{\beta^2}{4} \right) \tag{15}$$

(s-a neglijat un termen de ordinul doi în raport cu $\beta^2$; expresia 15 are exactitate suficientă).

5.7.2. **Valoarea eficace a curentului din secundarul şi primarul transformatorului.** În cazul montajului punte, valoarea calculată mai sus $I_{d \cdot ef}$ reprezintă şi valoarea eficace $I_2$ întrucît întreg bobinajul secundar este parcurs de curentul de utilizare*

$$I_2 = I_{d \cdot ef} = I_{med} \left( 1 + \frac{\beta^2}{4} \right). \tag{16}$$

Dacă $m$ este raportul de transformare al transformatorului redresoric,

$$I_1 = I_{med} \left( 1 + \frac{\beta^2}{4} \right) \frac{1}{m} \tag{17}$$

(relaţia 17 este valabilă şi pentru montajul push-pull).

---

* La montajul push-pull, în fiecare jumătate înfăşurare secundară, curentul nu circulă decît jumătate din timp; $I_2$ va fi cu $\sqrt{2}$ mai mică

$$I_2 = I_{med} \left( 1 + \frac{\beta^2}{4} \right) \frac{1}{\sqrt{2}}$$

5.7.3. **Factorul de putere** al circuitului de tracțiune se definește în mod uzual prin raportul:

$$\lambda = \frac{P}{P_a}$$

(nu se ține seamă de circuitele serviciilor auxiliare).

$P$ este puterea activă consumată în circuitul de tracțiune și transformator;

$P_a$ — puterea aparentă la primarul transformatorului.

Dacă, $U_d$ este tensiune medie redresată în circuitul de utilizare, conform relației (8) va fi $U_d = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 - \frac{2X_1'}{m^2} nI_{mot}$,

$n$ — numărul motoarelor legate în paralel;

$I_{mot}$ — curentul pe motor;

$$P = U_d \cdot nI_{mot} = \left[ \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 - \frac{2X_1'}{\pi m^2} nI_{mot} \right] nI_{mot}. \tag{18}$$

Puterea aparentă la primarul transformatorului va fi:

$$P_a = U_1 I_1 \tag{19}$$

$U_1 = mU_2$; $I_1 = I_{med}\left(1 + \frac{\beta^2}{4}\right)\frac{1}{m}$, conform relației (17).

Pentru o ondulație de ordinul $\beta = 25\%\, I_n$ (valoare uzuală), termenul $\left(1 + \frac{0{,}25^2}{4}\right) \simeq 1$ și $I_1 = \frac{I_{med}}{m} = \frac{nI_{mot}}{m}$.

Relația (19) devine: $$P_a = U_2 \cdot nI_{mot} \tag{20}$$

Factorul de putere va fi:

$$\lambda = \frac{P}{P_a} = \frac{\left(\frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 - \frac{2X_1'}{\pi m^2} \cdot nI_{mot}\right) \cdot nI_{mot}}{U_2 \cdot nI_{mot}} = \tag{21}$$

$$= \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 - \frac{2X_1'}{m^2} \cdot \frac{nI_{mot}}{U_2}.$$

Factorul de putere se stabilește prin calcul (relația 21) și odată cu probele de tip ale locomotivei se ridică experimental măsurînd valorile parametrilor de care depinde.

În diagrama din figura 5.20 este redată curba factorului de putere în funcție de viteză, pentru curentul nominal al motorului de tracțiune, al unei locomotive cu redresori (locomotiva BB — 16000 a SNCF). Se observă că în domeniul vitezelor uzuale, factorul de putere este în jur de 0,8.

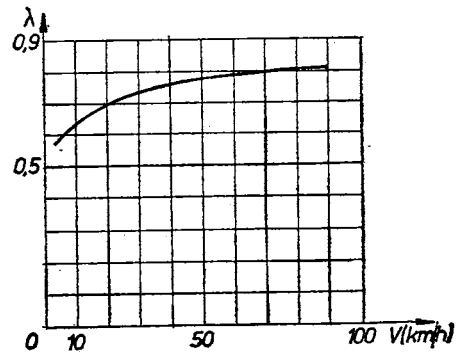


*Fig. 5.20.* Variația factorului de putere cu viteza.

## 5.8. DETERMINAREA NUMĂRULUI DE DIODE NECESARE LA ALCĂTUIREA REDRESORULUI

De regulă generală, parametrii diodelor de mare putere realizate actualmente în practică nu corespund parametrilor unui motor de tracțiune și apare necesitatea de a monta într-un braț al punții mai multe ramuri în paralel, iar în fiecare ramură mai multe diode în serie.

Numărul de diode necesare pentru realizarea unui braț al punții depinde, evident, de parametrii diodei folosite și de parametrii consumatorului alimentat de puntea de redresare, în speță motorul de tracțiune.

Determinarea numărului de diode necesare alcătuirii redresorului, de exemplu pentru soluția alimentării unui motor de tracțiune de la o punte redresoare (fig. 5.21), se poate face pornind de la considerentul că diodele nu suportă nici suprasarcini nici supratensiuni și deci se ia în considerare vîrful de curent și vîrful de tensiune ce poate apărea pe redresor.

Notînd cu:

$I_p$ — curentul maxim de pornire pe motor (dacă acesta nu este cunoscut se poate aproxima $I_p = 1{,}6I_h$ unde $I_h$ este curentul de regim uniorar, respectiv $I_h = (1{,}1 \ldots 1{,}15)I_n$;

$I_d$ — curentul mediu redresat al diodei (o diodă de un curent mediu redresat $I_d$ pentru o perioadă, este capabilă de $2I_d$ pentru o semiperioadă);

$U_2$ — valoarea eficace a tensiunii de la secundarul transformatorului (corespunzătoare tensiunii nominale a motorului);

$U_{ivr}$ — tensiune inversă repetitivă pe diodă;

$K_i$ — coeficient de siguranță în curent ($K_i = 1, 2 \ldots 1{,}5$);

$K_u$ — coeficient de siguranță în tensiune ($K_u = 2 \ldots 3{,}5$);

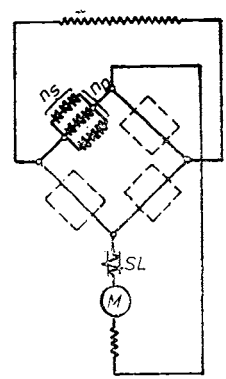


*Fig. 5.21.* Schema alcătuirii redresorului.

Coeficienții de siguranță $K_i$, $K_u$ țin seama de precauțiile și declasările în curent și tensiune la legarea în paralel și serie a diodelor.

$n_p$ — numărul ramurilor în paralel pe un braț al punții;

$n_s$ — numărul de diode în serie pe o ramură.

Se pot utiliza următoarele relații aproximative de calcul:

$$n_p = K_i \frac{I_p}{2I_d}; \tag{1}$$

$$n_s = K_u \frac{\sqrt{2}\, U_2}{U_{ivr}} \cdot \tag{2}$$

În relația $n_p$ s-a luat valoarea $2I_d$ întrucît o diodă cu un curent mediu redresat $I_d$ (considerat pentru o perioadă, adică ambele alternanțe) suportă $2I_d$ pentru alternanța pozitivă (adică o jumătate de perioadă) cît lucrează un braț al punții.

În relația $n_s$, tensiunea eficace $U_2$ la secundarul transformatorului se deduce din ecuația tensiunii medii redresate:

$$U_d = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 = 0{,}9U_2; \; U_2 = \frac{U_d}{0{,}9} \simeq \frac{U_{m\cdot nom}}{0{,}9}$$

(acoperitor, întrucît nu s-a ținut seamă de comutație).

Vîrful de tensiune (amplitudinea maximă) va fi $\sqrt{2}U_2$.

Exemplu de calcul pentru dimensionarea punții de redresare a locomotivei electrice 060—EA din parcul C.F.R.

Motorul de tracțiune folosit, tip $LJE_{108}$, are parametrii:
— curent de pornire $I_p = 2\,000$ $A$;
— tensiunea nominală $U_n = 770$ V ($U_2 = 770 : 0{,}9$)

Dioda siliciu utilizată $TU_{38}$ are parametrii:
— curent nominal $I_d = 300$ A;
— tensiunea maximă inversă repetitivă $U_{ivr} = 1\,300$ V.

Relațiile (1) și (2) devin:

$$n_p = 1{,}2 \frac{2\,000}{2 \times 300} = 4 \text{ ramuri în paralel;}$$

$$n_s = 3 \frac{\sqrt{2} \cdot 770}{0{,}9 \cdot 1\,300} = 2{,}76 \text{ rotund 3 diode în serie pe ramură.}$$

Întreaga punte necesită 4 brațe × 4 ramuri/braț × 3 diode/ramură = 48 diode.

## 5.9. PROTECȚIA REDRESOARELOR SEMICONDUCTOARE

Redresorul cu siliciu, așa cum s-a arătat, are o serie de avantaje (randament ridicat, siguranță mare în funcționare, necesarul de piese de schimb foarte redus, întreținere redusă), în schimb prezintă și unele dezavantaje

dintre care mai importante sînt capacitate de suprasarcină foarte redusă și sensibilitate mare la supratensiuni ridicate de scurtă durată.

De aceea, redresorul cu siliciu în mod practic se dimensionează în funcție de cel mai ridicat punct de sarcină ce poate apărea în serviciu și trebuie să fie protejat contra efectelor curenților de scurtcircuit prin aparataj de ruptură cu acțiune rapidă, adaptat la caracteristica de suprasarcină.

De asemenea, redresorul trebuie să prezinte o marjă de securitate suficientă în privința tensiunii, iar supratensiunile trebuie să fie limitate de aparataj de protecție corespunzător.

5.9.1. **Capacitatea de suprasarcină a unei diode de siliciu.** Comportarea unei diode cu siliciu la o suprasarcină, din punct de vedere teoretic, este o problemă foarte complicată datorită faptului că elementele constitutive ale unei diode (pastila de siliciu, electrozii, capsula, radiatorul etc.) se comportă extrem de divers din punct de vedere termic.

Așa, spre exemplu, pastila de siliciu reprezintă un acumulator cu o slabă capacitate de absorbție termică, fapt ce conduce la o încălzire foarte rapidă (temperatura crește exponențial și valoarea sa finală este atinsă într-un timp de ordinul a 1 ms).

Electrozii și capsula au o capacitate termică mult mai mare decît pastila de siliciu, avînd o constantă de timp globală de ordinul a 100 ... 200 ms.

Radiatorul diodei, avînd o constantă de timp de ordinul a 100 s ajută, prin ventilarea lui forțată, la ameliorarea transmisiei de căldură și în consecință este elementul care determină capacitatea de sarcină a unei diode.

Pentru formarea unei idei orientative în această problemă, în figura 5.22 s-a reprezentat caracteristica de suprasarcină a diodei TU—38 folosită la redresoarele locomotivelor C.F.R.

Din examinarea caracteristicii de suprasarcină rezultă că, pentru suprasarcini care durează mai multe secunde, diodele nu pot suporta decît valori

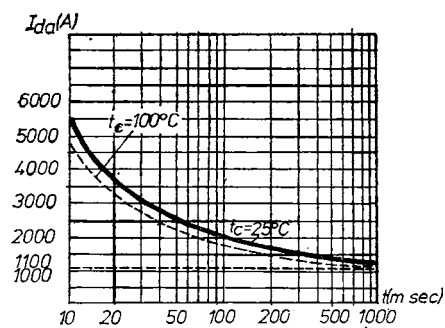



*Fig. 5.22.* Caracteristica de suprasarcină accidentală a diodei TU — 38 : $t_c$ = 25°C temperatura capsulei (dioda în stare rece); $t_c$ = = 100°C (dioda în stare caldă — situația redresorului în serviciu).

foarte puțin superioare curentului nominal*, motiv pentru care redresoarele cu siliciu se dimensionează în funcție de suprasarcinile ce pot apărea în exploatare și în afară de aceasta este necesar a fi luate măsuri atente pentru protecție.

---

* Dioda $TU_{38}$ are curentul mediu redresat $I_d$ = 350 A (pentru o perioadă); orice diodă este capabilă de un curent de vîrf $I_{dv}=\pi I_d$ în intervalul unei perioade, considerent pentru care în figura 5.22 s-a limitat $I_{d\cdot v}$ la cca 1000 A.

În instalațiile de redresare cu semiconductoare pot apărea următoarele defecțiuni:

— defecțiuni interne, adică incidente în interiorul ansamblului redresor (defecțiuni proprii), care pot apărea în circuitul de ventilație și se manifestă prin clacajul celulelor;

— defecțiuni externe, care apar pe partea redresată sau pe partea de alimentare (este vorba de scurtcircuite).

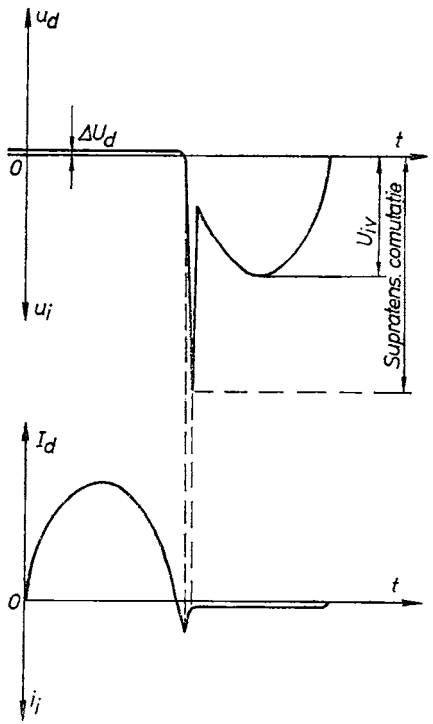



*Fig. 5.23.* Supratensiunea de comutație la o diodă.

*Suprasarcini.* Redresoarele cu sarcină variabilă sînt dimensionate după caracteristica lor de suprasarcină, luînd în considerare cea mai mare valoare a curentului ce poate fi atinsă. Cînd această limită este depășită, dispozitivul de protecție trebuie să scoată redresorul din serviciu.

5.9.2. **Supratensiuni de comutație.** La inversarea sensului curentului în celulă, aceasta nu se blochează instantaneu la trecerea alternanței prin zero, ci conducția continuă și în sens invers un timp extrem de scurt, apoi curentul revine la zero. Rezultă o supratensiune $e = \frac{di}{dt}$ zisă de comutație care poate atinge pînă la de trei ori tensiunea inversă de vîrf ($U_{iv}$). Acest fenomen este reprezentat în figura 5.23 și el poate căpăta aspectul unei unde oscilatorii amortizată. Pentru evitarea fenomenelor de oscilație se montează în paralel cu fiecare celulă un circuit cu capacitate și rezistență (fig. 5.24), care în același timp limitează și valoarea supratensiunii de comutație (fig. 5.25), $R$ și $C$ se aleg astfel încît constanta de timp $RC$ să fie inferioară duratei de comutație, adică de ordinul 4 la 5μs.

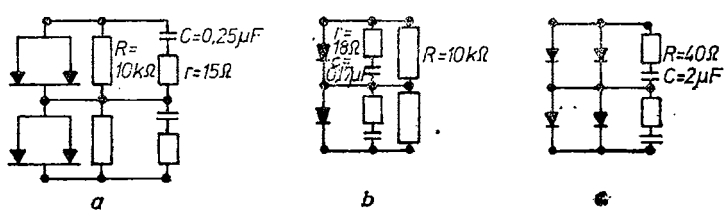



*Fig. 5.24.* Protecția redresorului la supratensiuni (variante); $C$ — de ordinul μF; $r$ — de ordinul Ω; $R$ — de ordinul KΩ, pentru repartiția tensiunii între diodele înseriate.

5.9.3. **Supratensiuni de origine externă în raport cu redresorul.** În această situație intră supratensiunile datorate descărcărilor atmosferice (cînd un trăsnet cade pe linia de contact sau pe o linie electrică vecină și care prin

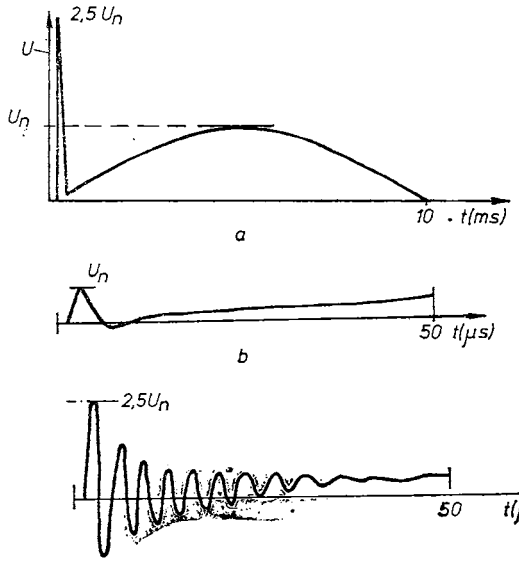



*Fig. 5.25.* Diagrama limitării supratensiunii de comutație prin dispozitiv *CR*: *a* — supratensiunea de comutație; *b* — amortizarea oscilației și limitarea supratensiunii prin dispozitiv *RC*; *c* — supratensiunea și oscilația ei fără dispozitiv *RC* de protecție.

inducție statică și electromagnetică induce o supratensiune în linia de contact) și cele ce provin din închiderea sau deschiderea întrerupătorului automat principal. Protecția la supratensiuni de origine atmosferică este de regulă asigurată prin descărcător, iar celelalte supratensiuni ajung la redresor prin transformator (se aplică prin secundarul transformatorului) și de altminteri șocul de supratensiune este de foarte scurtă durată (μs). În ceea ce privește protecția redresorului la astfel de supratensiuni de origine externă, ea este asigurată pe de o parte prin măsuri speciale ce se iau în construcția transformatorului (ecrane parasupratensiuni între bobinajele transformatorului și legate la masă), iar rezistențele montate în paralel pe diodele legate în serie (*R* — fig. 5.24) pentru repartiția egală a tensiunii, repartizează pe diode și șocul de supratensiune

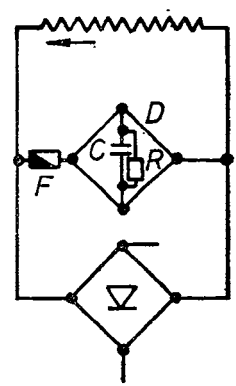



*Fig. 5.26.* Protecția redresorului la supratensiuni de origine externă transmise prin transformator.

Unele locomotive electrice folosesc pentru protecția la supratensiuni a redresorului o instalație alcătuită dintr-o punte redresoare cu diode (*D*) montată pe partea de curent alternativ (fig. 5.26) cu o diagonală, iar pe cealaltă diagonală este conectat un condensator (*C*) care se descarcă pe o rezistență (*R*).

La apariția unei supratensiuni transmisă de la secundarul transformatorului, condensatorul (*C*) se încarcă (trage un curent) și produce o cădere de tensiune în secundarul transformatorului protejînd deci redresorul. La dispariția supratensiunii, *C* se descarcă pe rezistorul *R*.

5.9.4. **Metode de protecție a redresoarelor la suprasarcini și scurtcircuite.**

*a. Protecția prin fuzibile.* Se utilizează atît pentru scurtcircuite interne cît și pentru cele externe.

De asemenea, se aplică și pentru protecția contra suprasarcinilor, în care scop caracteristica de fuziune a fuzibilului se alege astfel, încît ea să coincidă cu caracteristica de suprasarcină a diodei. Montajul fuzibilelor depinde de tipul diodei, de montajul diodelor în grupul de redresoare, de caracteristicile fuzibilului, de caracteristicile diodei etc.

Astfel se utilizează: montajul în care fiecare diodă este protejată printr-un fuzibil care trebuie dimensionat după valoarea curentului diodei; montajul fuzibilelor în linia de alimentare în curent alternativ; montajul fuzibilelor pe partea redresată; montajul fuzibilelor și pe partea de curent alternativ și pe partea redresată. În figura 5.27 sînt redate cîteva scheme posibile de protecție prin fuzibile a redresoarelor monofazate cu siliciu.

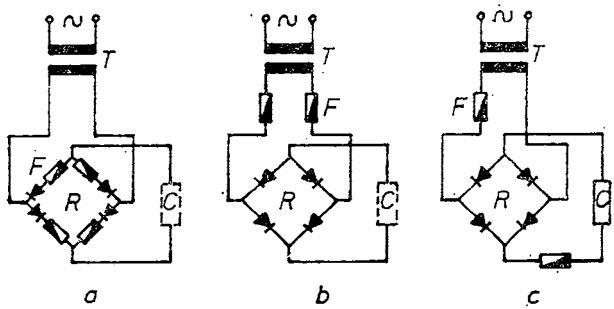



*Fig. 5.27.* Protecția prin fuzibile: *a* — un fuzibil pe diodă; *b* — fuzibile pe partea alternativă; *c* — fuzibile pe partea alternativă și pe partea de curent continuu.

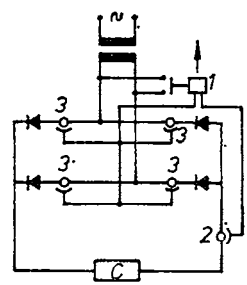



*Fig. 5.28.* Protecția prin scurtcircuitor; *1* — scurtcircuitor; *2, 3* — transformator de impulsuri.

Fuzibilele folosite la protecția diodelor sînt de tip special potrivit scopului, adică trebuie să rupă curenții de scurtcircuit în timp extrem de redus, să prezinte o tensiune de arc joasă, să aibă dimensiuni reduse și să prezinte pierderi mici.

*b. Protecția prin scurtcircuitor.* Așa cum s-a menționat, capacitatea de suprasarcină a unei diode este foarte slabă. Nu pot fi utilizate disjunctoare de curent continuu întrucît s-ar complica prea mult schema.

În asemenea situații se recurge la un scurtcircuitor care funcționează mult mai rapid și care, la apariția unui defect pe partea de curent redresat, pune în scurtcircuit, în circa 2 ms, secundarul transformatorului de alimentare a redresorului.

Schema de principiu pentru protecție prin scurtcircuitor este reprezentată în figura 5.28. Impulsul de declanșare se transmite scurtcircuitorului de către transformatoarele de impulsuri, atunci cînd curentul depășește o anumită limită sau viteza de creștere a curentului depășește o anumită limită, ceea ce permite scurtcircuitorului să intervină din momentul apariției unui scurtcircuit.

Schema din figura 5.28 corespunde pentru o protecție la suprasarcini atît la scurtcircuite externe (acționează transformatorul de impulsuri *2*), cît și la scurtcircuite interne (acționează transformatoarele de impulsuri *3*).

*c. Protecția prin separator rapid.* Cînd un grup redresor este destinat să alimenteze o instalație în care se produc frecvent scurtcircuite și cînd transformatorul n-a fost construit astfel ca să suporte puneri în scurtcircuit frecvente, se preferă protecția grupului redresor prin separatoare rapide, care se montează în două ramuri consecutive ale punții. Schema de principiu pentru protecția prin separatoare rapide este reprezentată în figura 5.29.

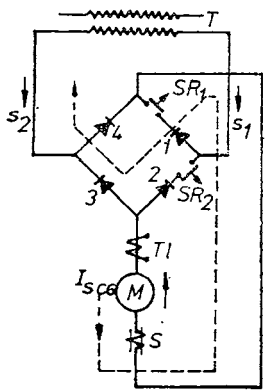



*Fig. 5.29.* Protecția prin separatoare rapide: $SR_1$, $SR_2$ — separatoare rapide; *Ti* — transformator de impulsuri.

Cînd se produce un scurtcircuit ($I_{scc}$) ca în schemă, dacă în acest moment sensul tensiunii alternative produse de secundarul transformatorului $T$ corespunde săgeții $s_1$, curentul de scurtcircuit va trece prin ramura *1* a punții, separatorul $SR_1$ închis, diagonala cu motorul $M$ și ramura *4*. Transformatorul de impuls $TI$ comandă deschiderea separatorului rapid $SR_2$ care în acest moment nu este parcurs de curent. Cînd la bornele redresorului apare alternanța cu sensul săgeții $s_2$, aceasta nu mai poate alimenta scurtcircuitul din diagonala motorului, deoarece drumul curentului pentru alternanța $s_2$ trece prin ramura punții *2*, unde $SR_2$ este deschis. În intervalul de timp corespunzător alternanței $s_2$, nemaitrecînd curent prin ramura punții *1*, transformatorul de impuls dă comandă de declanșare și lui $SR_1$, situație în care întreaga punte de redresare este scoasă din circuit.

Timpul de declanșare a separatorului rezultă din relația dintre perioada $T$ și frecvența $f$, adică $T = \frac{1}{f}$ iar pentru o semiperioadă $\frac{T}{2} = \frac{1}{2 \cdot f}$ ceea ce conduce pentru $f = 50$ Hz la $\frac{T}{2} = \frac{1}{2.50} = 0{,}01$ s $= 10$ ms.

Întreruperea curentului de scurtcircuit va trebui să aibă loc într-o semiperioadă, adică într-un timp mai mic de 10 ms.

*d. Protecția redresorului bazată pe timpul de declanșare al întrerupătorului automat principal*

În prezent, datorită realizării elementelor semiconductoare cu parametrii mereu sporiți, există tendința ca la construcțiile noi de locomotive să nu se mai prevadă nici una din metodele indicate mai sus pentru protecția la scurtcircuit și suprasarcini, ci aceasta se bazează numai pe timpul de declanșare a automatului principal (se simplifică schema, se elimină dispozitivul de protecție).

Decizia de a elimina dispozitivul de protecție nu se poate lua decît pe baza unui calcul al curentului de scurtcircuit ce poate apărea pe redresor în condiția cea mai dificilă de exploatare care conduce la valoarea maximă a curentului de scurtcircuit și verificarea acestuia cu acel ce poate fi suportat de diodă (tiristor) în timpul de declanșare al automatului și care este indicat în caracteristica de suprasarcină a diodei (fig. 5.22).

Condițiile de care se țin seamă la calcul și la verificarea experimentală a curentului de scurtcircuit și care conduc la valoarea lui maximă sînt următoarele:

— Locomotiva se consideră plasată în dreptul substației de tracțiune, cînd impedanța liniei de contact este minimă;

— Valoarea tensiunii liniei de contact se admite cea maximă prevăzută de norme ($U_{LC} = 27{,}5$ kV).

— Dacă pentru substația de tracțiune se prevede ca în anumite situații de exploatare să lucreze ambele transformatoare se va lua în calcul această situație cu ambele transformatoare legate în paralel; reactanța substației este minimă în acest caz;

— În ipoteza că locomotiva este înzestrată cu graduator se va lua în considerare plasarea lui pe ultima treaptă, poziție pentru care reactanța transformatorului locomotivei este minimă.

Un calcul simplificat pentru determinarea valorii curentului maxim de scurtcircuit pe diodă ($I_{1k}$) pentru o locomotivă, în condițiile prevăzute mai sus, se poate efectua ca mai jos.

Notînd:

$u_{1k}$ — valoarea procentuală a tensiunii de scurtcircuit a transformatorului locomotivei pe ultima poziție a graduatorului (se ridică experimental la platformă de constructorul transformatorului; este deci un parametru cunoscut);

$I_n$ — curentul nominal al transformatorului de tracțiune (este un parametru indicat de furnizorul transformatorului).

Valoarea stabilizată a curentului de scurtcircuit va fi:

$$I_k = \frac{100}{u_{1k}} I_n$$

Vîrful de curent la scurtcircuit va fi:

$$I_{k.v} = 2I_k$$

Rezultă pe diodă

$$I_{1k} = \frac{I_{k.v}}{n_p},$$

unde $n_p$ este numărul ramurilor în paralel pe brațul punții de redresare.

Reactanța totală (mai simplu valori procentuale) de la sistem energetic — locomotivă, va fi:

— reactanța sistemului energetic $X_{SE}\% = \frac{S_b}{S_{SE}} 100$; $S_b$—puterea transformatorului de pe locomotivă; $S_{SE}$ — puterea de scurtcircuit a sistemului la barele 110 kV ale substației de tracțiune;

— reactanța transformatorului din substație, $X_{ST}\% = u_k \frac{S_b}{S_{ST}}$; $u_k$ — tensiunea de scurtcircuit procentuală a transformatorului din substație; $S_{ST}$ — puterea transformatorului din substație;

— reactanța liniei de contact, $X_{LC}\%$;

— reactanța transformaforului $LE$ la $U_{LC} = 25$ kV pe poziția graduatorului considerată, ... $X_{T\cdot LE}$ %;

— reactanța cablelor de legătură, $X_{c\cdot l}$ % (se aproximează).

Reactanța totală va fi:

$$X_{t(25\,\text{kV})}\,\% = 2X_{SE} + X_{ST} + X_{LC} + X_{T\cdot LE} + X_{cl}.$$

Reactanța totală raportată la 27,5 kV (tensiunea în gol la barele substației) va fi:

$$X_{t(27{,}5)}\% = X_{t(25)}\frac{25^2}{27{,}5^2}$$

Coeficientul de creștere al reactanței ($c_{1k}$ al transformatorului $LE$ pe baza căreia s-a calculat $I_{1k/\text{diodă}}$) va fi:

$$c = \frac{u_{1k}}{X_{t(27{,}5)}},$$

iar curentul de scurtcircuit real pe diodă;

$$I_{1k(real)} = \frac{I_{1k}}{c}.$$

Această valoare $I_{1k}$ se compară cu valoarea curentului direct de vîrf de suprasarcină accidentală corespunzătoare la timpul de declanșare indicat pentru disjunctorul locomotivei; la disjunctoarele folosite pe $LE$ $t_d = 50$ ms.

În ipoteza că $I_{1k} > I_{s.c}$, atunci se suplimentează numărul ramurilor în paralel pe braț ($n_p$).

De regulă generală curentul de scurtcircuit pe redresor $I_{kv}$ se măsoară pe locomotivă (în condițiile dificile menționate) cu ocazia „probelor de tip'' ale locomotivei (Normele internaționale IEC Nr. 165/1973 și nr. 411/1973).

## 5.10. APARATAJ ȘI UTILAJ PRINCIPAL

5.10.1. **Întrerupătorul automat principal (disjunctorul).** Este aparatul care realizează întreruperea generală a circuitelor electrice ale locomotivei, asigurînd protecția la suprasarcini și scurtcircuite (poz. 6, fig. 51). El poate fi comandat pentru conectare sau deconectare de la distanță (de pe pupitrul de comandă) și deconectează automat sub sarcină, la suprasarcini, scurtcircuite sau în caz de defect la un alt circuit al locomotivei cu care este corelat ca protecție.

Construcția este asemănătoare cu a întrerupătoarelor automate de curent alternativ de înaltă tensiune folosite curent în energetică.

În momentul cînd se produce un scurtcircuit, curentul crește foarte repede și de aceea trebuie rupt înainte de a junge la valoarea lui stabilizată, ceea

ce impune aparatului un timp de declanșare foarte mic. Curentul variind de la valoarea sa normală din circuit la valoarea celui de scurtcircuit se produce evident fenomenul de autoinducție datorită căruia o întrerupere bruscă a circuitului provoacă supratensiuni de comutație periculoase și menține arcul voltaic la contactul de rupere, cu efecte nocive. Pentru evitarea acestor neajunsuri la construcțiile recente, ruperea circuitului se face în doi timpi în care scop contactului de rupere propriu-zis i se asociază și un separator. O schemă funcțională de principiu pentru un asemenea întrerupător automat este redată în figura 5.30, din a cărei examinare rezultă următoarele:

— în poziția *a*), întrerupătorul este conectat; atît contactul propriu-zis *C* cît și separatorul *S* sînt închise;

— în poziția *b*), contactul *C* se deschide, iar curentul trece prin rezistența

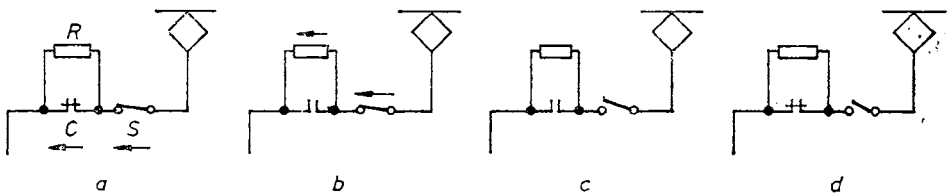



*Fig. 5.30.* Schema de principiu a unui întrerupător cu ruperea circuitului în doi timpi.

*R* limitîndu-i valoarea și deci contactul *C* rupe un curent mai redus avînd ca efect limitarea supratensiunilor de comutație și a flamei;

— în poziția *c*), întrerupătorul este deconectat; se deschide și separatorul *S*;

— în poziția *d*), întrerupătorul este deconectat (numai prin separatorul *S*), însă cu contactul *C* închis; întrerupătorul este de tipul cu contact normal închis.

Dintre tipurile de întrerupătoare automate de curent alternativ și înaltă tensiune folosite în energetică, întrerupătoare cu ulei mult, întrerupătoare cu ulei puțin și întrerupătoare cu aer comprimat, pe locomotivele electrice de curent monofazat 25 kV au găsit o largă aplicare întrerupătoarele ultrarapide cu aer comprimat. Un astfel de întrerupător de construcție modernă este tipul *D.B.T.F.* (fabricație Brown-Boveri), care a dat rezultate bune în exploatare și care va fi prezentat ca exemplificare.

Pentru satisfacerea exigențelor cerute de exploatarea unei locomotive electrice, întrerupătorul principal trebuie să îndeplinească următoarele cerințe:

— să declanșeze într-un timp scurt la scurtcircuit și suprasarcină (de unde denumirea de ultrarapid);

— să nu prezinte pericol de explozie;

— să aibă dimensiuni și greutate redusă pentru a putea fi montat pe acoperișul locomotivei;

— să prezinte putere de rupere ridicată;

— să prezinte un nivel de izolație corespunzător tensiunii nominale de lucru și mediul în care este obligat să lucreze (în exterior).

1. Datele tehnice ale întrerupătorului tip *D.B.T.F.* (30—i—50) sînt următoarele:

— tensiune nominală . . . . . 25 kV;
— tensiunea de încercare . . . . . 75 kV;
— curentul nominal . . . . . 400 A;
— puterea de rupere la tensiunea nominală și la presiunea aerului 7 kg/cm² . . . . . 250 MVA;
— greutatea totală . . . . . 150 kg;
— consumul de aer pe manevră, la 7 kg/cm² . . . . . 35 l;
— timp de declanșare . . . . . 0,035 s.

*Construcția și funcționarea*

*a*) *Declanșarea automatului* se produce prin trimiterea unui curent de comandă în bobina supapei de declanșare $g_d$ care, deschizîndu-se permite trecerea aerului comprimat prin canalul *1* în spatele supapei principale *i* pe care o deplasează spre stînga (resortul *2* se comprimă), iar aerul comprimat pătrunde prin canalul *3* în camera de rupere *b*. Datorită presiunii aerului comprimat, contactul mobil $C_m$ se deplasează spre stînga (resortul *4* se comprimă). În momentul desprinderii contactului mobil (care este realizat în formă de țeavă) de pe contactul fix $C_f$, aerul comprimat pătrunde în canalul *5*, stingînd arcul electric care ia naștere în momentul ruperii circuitului. Cînd are loc deschiderea supapei principale *i*, aerul comprimat pătrunde simultan și pe calea *6* în supapa cu acțiune diferențială *k* și prin intermediul ei în cilindrul *h* care, prin sistemul de pîrghii *7* și axul *7'*, deschide separatorul *C* (îl rotește în plan orizontal) și închide supapa $g_d$ prin axul cu came *8*. Sub influența resortului *2* supapa principală *i* revine la poziția inițială, iar datorită resortului *4*, contactul mobil $C_m$ se închide, însă circuitul rămîne întrerupt întrucît separatorul automatului *C* este desfăcut. Automatul este deci cu contact normal închis.

Supapa *k* este considerată cu acțiune diferențială, întrucît ea comandă deschiderea separatorului numai după ce a avut loc stingerea arcului electric.

Rezistența *d* (inductivă) care este conectată în paralel pe camera de rupere *b* are drept scop de a limita supratensiunile ce pot proveni în timpul manevrărilor automatului.

*b*) *Anclașarea automatului* se produce în mod simplu, prin trimiterea unui curent de comandă în supapa de anclașare $g_a$, care, deschizîndu-se, permite trecerea aerului comprimat prin canalul *9*, provocînd mișcarea inversă a pistonului *h* și deci închiderea separatorului *C*. Punctele *A* și *B* sînt bornele de conexiuni ale automatului.

Din punct de vedere constructiv piesele care efectuează mișcări au masă redusă, sînt simple și supuse la forțe mari de propulsie; în acest mod se asigură o funcționare rapidă și sigură.

*c*) *Punerea în serviciu.* În mod normal, automatul funcționează cu aer comprimat din rețeaua de aer comprimat a locomotivei. Pentru cazul cînd locomotiva a staționat un timp îndelungat și disponibilul de aer comprimat al rețelei s-a epuizat, pentru punerea în funcțiune a grupului compresor trebuie anclanșat automatul și trebuie ridicat pantograful la linia de contact.

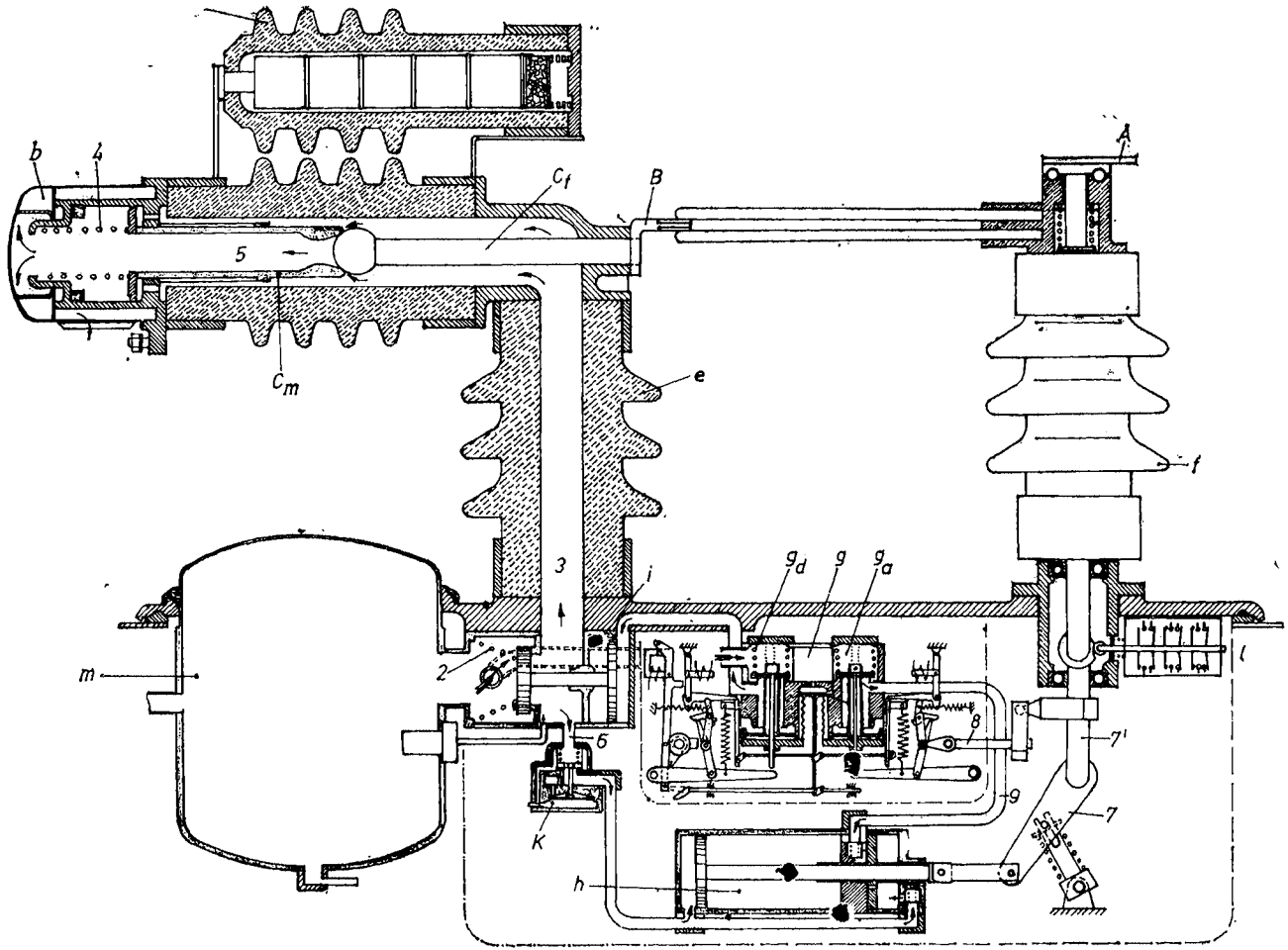



*Fig. 5.31.* Secțiunea schematică prin întrerupătorul automat tip DBTF.

Problema punerii în serviciu a automatului se poate rezolva astfel:

— separatorul automatului *C* se poate închide manual; este necesar în acest scop un blocaj între separator și comanda pantografului, în sensul că manevra de închidere a separatorului nu se poate efectua decît cu pantograful jos, adică fără tensiune;

— aerul comprimat necesar întrerupătorului poate fi furnizat fie cu ajutorul unei pompe de mînă (de obicei aceeași care deservește și pantograful) sau instalînd un mic compresor auxiliar care să asigure debitul necesar unei singure manevre, antrenat de un electromotor alimentat din bateria de acumulatoare; pentru o acționare în deplină securitate este suficient ca acest compresor auxiliar să asigure o presiune de 5 kgf/cm$^2$ în rezervor, care se poate obține în 2 ... 3 min de funcționare.

Acest grup compresor auxiliar poate deservi și pantograful. Dacă se montează un asemenea grup compresor auxiliar nu mai este necesar a se prevedea și o pompă de mînă pentru punerea în serviciu a automatului și a pantografului.

5.10.2. **Descărcătoare cu rezistență variabilă.** Pentru protecția locomotivei la supratensiuni de origine atmosferică (acestea pot atinge sute kV cu duartă de ordinul μs) și supratensiuni de comutație (valori mai reduse însă cu durată mai mare) se utilizează descărcătorul cu rezistență variabiă (poz. *5*, fig. 5.1.) montat în paralel între circuitul de forță și pămînt.

Elementele componente ale descărcătorului folosit pe locomotivele de curent monofazat (fig. 5.32) sînt următoarele:

1 — intervale disruptive realizate din electrozi de tablă de alamă distanțați prin piese izolante din steatit;

2 — rezistențe de valoare mare, pentru repartizarea uniformă a tensiunii, între intervalele disruptive;

3 — bloc de rezistențe nelineare, din carbură de siliciu cu un liant; ele au proprietatea de a prezenta o rezistență mare la curenți mici și o rezistență mică la curenți mari.

Aceste elemente sînt închise într-un izolator de porțelan gol pe dinăuntru și flanșat etanș la capete; un descărcător montat pe locomotivă are dimensiunile 200 — 250 mm diametru, 750 — 800 mm lungime și circa 20 kgf.

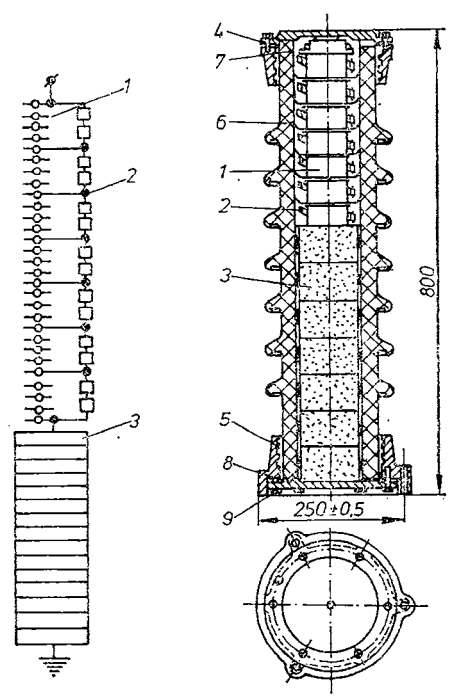


*Fig. 5.32.* Descărcător cu rezistență variabilă.

Pînă la tensiunea maximă admisă în linia de contact 27,5 kV, intervalele disruptive blochează scurgerea curentului spre masă. La o supratensiune periculoasă intervalele disruptive se străpung (rezistența tinde către zero),

iar curentul se scurge la pămînt; curentul are valori mari (ordinul KA) însă căderea de tensiune de vîrf nu depășește de regulă tensiunea de încercare a transformatorului (de ordinul a zeci kV) care este primul element atins de supratensiune.

Parametrii principali de definire ai unui descărcător de locomotivă sînt următorii:

— tensiunea nominală . . . . . 25 kV

— tensiunea de exploatare maximă (la care nu intră în acțiune) . . . 30 kV

— tensiune de amorsare (la care intră în acțiune) . . . 58 kV.

5.10.3. **Motorul de curent ondulat.** Așa cum s-a arătat, la funcționarea redresorului monofazat pe un motor de tracțiune, tensiunea redresată la care este supus motorul are forma din figura 5.33, iar curentul ce traversează motorul este ondulat cu aspectul de variație indicat în diagrama din figura 5.34.

Tensiunea de alimentare a motorului poate fi considerată ca rezultanta unei tensiuni continui $U_{med} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2(1 + \cos\gamma)$ și unei tensiuni alternative nesinusoidală de frecvență $2f$ ($f$—frecvența rețelei) datorată armonicelor generate în principal de fenomenul comutației în redresor (s-a luat în considerație numai prima armonică dominantă: restul armonicelor superioare fiind de amplitudini mici, s-au neglijat). Pentru cazul curent al redresoarelor monofazate cu diode (nu și în cazul tiristoarelor unde se reglează unghiul de aprindere) pe bază de ridicări oscilografiate se poate admite cu suficientă aproximație $U_{max} = (1{,}85 \ldots 1{,}95)\ U_{med}$.

Curentul ondulat ce străbate motorul, de asemenea poate fi descompus (fig. 5.34) într-un curent mediu, $I_{med}$, care produce cuplul util și o componentă alternativă nesinusoidală de frecvență $2f$ (componentele armonice

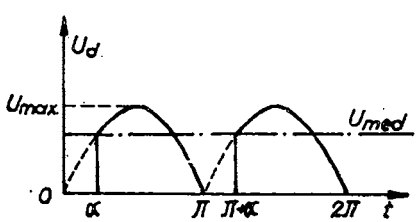



*Fig. 5.33.* Forma tensiunii de alimentare a motorului.

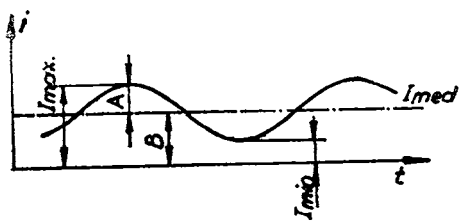



*Fig. 5.34.* Forma curentului ce trece prin motor.

de ordin superior 200, 300 Hz ... fiind practic neglijabile). Componenta de 100 Hz a curentului (componenta alternativă) creează fenomene al căror efect acționează în sens defavorabil asupra bunei funcționări a motorului: agravarea comutației, încălzire mai pronunțată, stabilitatea, regimurile tranzitorii ...

Datorită acestei componente (100 Hz), care trecînd prin polii principali ai motorului dă naștere unei componente alternative a fluxului care generează în spirele de comutație o f.e.m. statică $e_{tr}$ analoagă celei existente în motorul monofazat 50 Hz (care agravează comutația) și de asemenea dă loc

la pierderi suplimentare în motor (pierderi Joule, pierderi hysterezis, curenți Foucault) care provoacă celelalte neajunsuri.

Din acest punct de vedere motorul de curent ondulat pare a se situa între motorul de curent continuu și motorul monofazat 50 Hz și se impun măsuri ca fenomenele mai sus menționate să fie atenuate astfel încît funcționarea motorului să prezinte caracteristici și securitate aproape egale celora unui același motor alimentat în curent continuu.

Efectele componentei alternative vor fi cu atît mai reduse cu cît amplitudinea acestei componente va fi mai mică în raport cu componenta continuă, de unde se deduce și noțiunea de nivel al ondulației (coeficient de ondulație $\alpha$ al intensității) care se definește ca raportul dintre semiamplitudinea ondulației $A$ și valoarea medie a curentului redresat $B$ (fig. 5.34).

$$\alpha = \frac{A}{B} = \frac{\frac{I_{max} - I_{min}}{2}}{\frac{I_{max} + I_{min}}{2}} = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} = \frac{I_{max} - I_{min}}{2I_{med}}$$

Pentru a reduce amplitudinea componentei alternative, respectiv a diminua ondulația curentului, trebuie ca circuitul să prezinte o inductanță mare. Cum selfinductanța proprie a motorului este relativ scăzută, impune *montarea selfului de aplatisare* cu selfinductanță mare și care trebuie dimensionat astfel ca să nu prezinte saturație importantă în toată zona de utilizare a motorului și în același timp nu trebuie exagerat cu mărirea selfinductanței selfului din considerente de greutate și economice. Numeroase încercări au arătat că un nivel de ondulație de ordinul 25 ... 30% la regimul nominal de definire a motorului conduce la un compromis satisfăcător din toate punctele de vedere.

*Notă.* Relativ la producerea t.e.m. $e_{tr}$, care conduce la agravarea comutației, este o diferență între motorul monofazat direct și motorul de curent ondulat. La acesta din urmă, componenta alternativă 100 Hz a curentului ($i_{100\,ef}$) este aceea care produce $e_{tr}$ și a cărei expresie este:

$$i_{100ef} = \frac{u_{100\,ef}}{L2\omega},$$

în care $u_{100ef}$ este valoarea eficace a componentei alternative a tensiunii;

$L$ — inductanța circuitului (în principal conținută în selful de aplatisare);

$2\omega$ — pulsația corespunzătoare frecvenței 100 Hz.

Cum $u_{100\,ef}$ și $U_{med}$ sînt proporționale, rezultă:

$$i_{100\,ef} = \frac{K}{2\sqrt{2}} \cdot \frac{U_{med}}{L\omega}.$$

K = 0,85 pentru un unghi de comutație normal de 30° (caz curent).

Rezultă că f.e.m. statică $e_{tr}$ care apare în motorul de curent ondulat este legată de tensiunea de alimentare a motorului și nu de valoarea curentului ca la motorul monofazat.

Demararea motorului făcîndu-se cu tensiune mică, practic rezultă pentru $e_{tr} \simeq 1V$ valoare neglijabilă și care nu ridică probleme.

Se reamintește că în cazul motorului monofazat, pentru diminuarea lui $e_{tr}$ se șuntează polii auxiliari printr-o rezistență în scopul defazării convenabile a $I_{PA}$ care induce în secția comutată o componentă opusă lui $e_{tr}$. O șuntare a *PA* nu se practică la motorul de curent ondulat din motivele expuse mai sus.

Unii constructori folosesc și soluția *șuntării permanente a polilor principali* printr-o rezistență ohmică de valoare mare, în raport cu aceea a înfășurării polilor principali, astfel ca prin șunt să nu se derive decît circa 10% din curent, în timp ce componenta alternativă se derivă integral din cauza inductivității neglijabile în raport cu aceea a polilor principali. În acest mod se scapă de influența nocivă a componentei alternative. Este de menționat că șuntul ohmic diminuează selfinductanța echivalentă totală a circuitului, însă influența este neînsemnată din punct de vedere practic, față de aceea introdusă de selful de aplatisare.

În tehnica realizării motoarelor de curent ondulat se mai recurge și la următoarele măsuri:

— în scopul reducerii dimensionării motorului (acesta avînd un regim termic mai ridicat), în privința *izolației bobinajelor* se constată orientarea către clasele superioare de izolație *F* și *H*.

În special, clasa de izolare *H* este actualmente favorizată pentru următoarele avantaje:

— izolanții clasei *H* permit limite de încălzire mai ridicate: 160°C pentru indus și 180°C pentru inductor;

— izolanții clasei *H*, compuși exclusiv din sticlă, mică, silicon etc. au o foarte mare stabilitae chimică, dielectrică și mecanică;

— clasa *H* de izolare este singura în măsură să suporte și temperaturi foarte joase, de ordinul a — 50°C, recomandabilă pentru țările cu un asemenea climat.

Pentru aceleași dimensiuni și greutate de motor, clasa *H* de izolare permite un spor de putere de 12 ... 15% față de clasa *B*, în timp ce majorarea de preț este de ordinul a 5 ... 6%.

Încercările efectuate pe motoare moderne au arătat mici diferențe de temperatură între funcționarea în curent ondulat și în curent continuu, la același regim. Aceste diferențe sînt de ordinul:

2 ... 2,5% pentru indus
5 ... 6% pentru polii principali (înfășurarea de excitație)
2 ... 3% pentru colector.

— *Tensiunea nominală a motorului* de curent ondulat se alege între aceea a unui motor de curent continuu (1500 V) și aceea a unui motor de curent monofazat 16 2/3 (de ordinul 600 V). Tensiunea cea mai apropiată, care conduce la motorul cel mai omogen, se alege după regula motorului „pătrat" sau de „1 ohm" ceea ce revine aproximativ prin alegerea $U \simeq I \simeq \sqrt{P}$; ($P$ — puterea nominală, în W). Această regulă convine motoarelor cu $P < 1000$CP; pentru $P > 1000$ CP, tensiunea adoptată este din ce în ce mai inferioară legii $U \simeq \sqrt{P}$, întrucît din punct de vedere constructiv se poate realiza mai ușor un motor de intensitate mare decît de tensiune ridicată. Alegerea tensiunii nominale după această indicație conduce la $u$ (tensiunea medie între lamelele colectorului, în *V*) de valori acceptabile pentru o comutație bună a motorului.

— Tot din motive de diminuare a comutației, în scopul micșorării fluxului pe pol, motorul de curent ondulat se construiește de preferință cu un număr sporit de poli principali (intermediar între motorul de curent continuu și cel monofazat); de preferință 6 sau 8 poli. De asemenea, atît polii principali cît și cei auxiliari se execută din tole.

*Comparație între motorul de curent ondulat și motorul de curent continuu.*

*a) Randamentul* este determinat de pierderi:

— Pierderile Joulle vor fi $RI_{ef}^2$, respectiv $I_{ef} = I_{med}\left(1 + \frac{\mu^2}{4}\right)$ ceea ce conduce la $RI_{ef}^2 = RI_{med}^2\left(1 + \frac{\mu^2}{4}\right)^2 \simeq RI_{med}^2\left(1 + \frac{\mu^2}{2}\right)$. Pentru o valoare a ondulației de 0,3, factorul de majorare a pierderilor va fi $\left(1 + \frac{0{,}3^2}{2}\right) = 1{,}045$.

— Pierderile în fier suplimentare sînt date de ondulația armonicei 100 Hz care provoacă pulsația fluxului polilor principali (curenți Foucault în părțile masive, pierderi hyterezis ...).

Măsura în care aceste pierderi suplimentare penalizează motorul de curent ondulat, a fost evidențiată prin ridicări experimentale a temperaturii unor motoare de tracțiune de curent ondulat puse să funcționeze la regim nominal și alimentate succesiv în curent continuu și în curent ondulat. Din analiza datelor experimentale se constată o creștere a temperaturilor de ordinul: 5—6% pentru indus, 8—10% pentru polii principali, 6—7% pentru colector, ceea ce arată că motorul de curent ondulat, din punct de vedere practic, nu prezintă o penalizare importantă în randamentul său, din cauza pierderilor suplimentare (randamentul motorului de curent ondulat și ondulație 30% este inferior celui de curent continuu cu 0,2..., 0,4%, deci caracteristicile de randament aproape se confundă).

*b) Cuplul motorului* de curent ondulat. Datorită ondulației curentului cuplul este pulsatoriu, cu oscilații între $1 - \mu$ și $1 + \mu$ față de cuplul mediu $C_{med}$, unde $\mu = \frac{i_{100max}}{I_{med}}$ (fig. 5.35). Aceasta îl diferențiază față de motorul monofazat cu colector unde cuplul oscilează cu aceeași frecvență 100 Hz între 0 și $2C_{med}$.

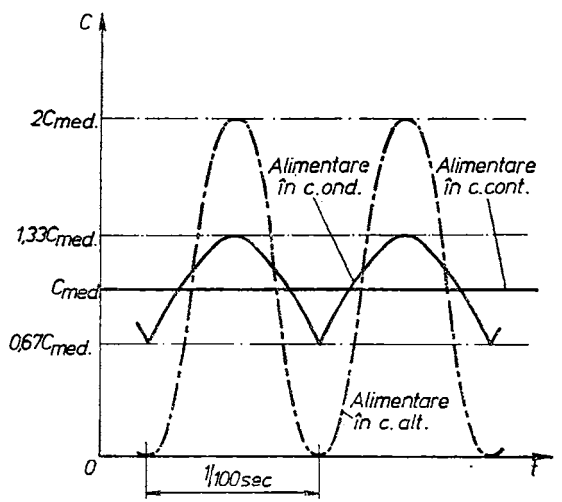



*Fig. 5.35.* Pulsația cuplului la motorul serie de curent ondulat.

*c) Caracteristicile* $V(I)$, $C(I)$, $\eta(I)$ și respectiv $F(V)$ ale motorului de curent ondulat sînt practic aceleași ca în curent continuu, în condițiile luării în considerare a valorilor medii.

Posibilitățile de reglare a vitezei prin tensiune, la motorul de curent ondulat ceea ce în curent continuu nu avem în aceeași măsură, permit să se adopte raportul $\frac{V_{reg.nominal}}{V_{max.serviciu}}$ la valori mai ridicate ceea ce conduce la puteri masice mai importante. Se mai adaugă și faptul că odată epuizată ultima treaptă de tensiune, reglarea se poate continua cu trepte de șuntare a excitației mărind astfel forța de tracțiune la viteze mari. Acest lucru este foarte important întrucît se cîștigă la forța de tracțiune fără mărirea tensiunii pe motor ceea ce diminuează dimensionarea transformatorului și redresorului.

### 5.10.4. **Motorul de tracțiune de curent ondulat tip LJE—108/1 folosit pe locomotivele electrice CFR**

| *Datele caracteristice* | Regim durată | Regim uniorar |
|---|---|---|
| Putere (kW) | 850 | 900 |
| Tensiune (V) | 770 | 770 |
| Curent (A) | 1180 | 1250 |
| Turație (rot/min) | 1100 | 1085 |
| Turație maximă (rot/min) | 1920 | |
| Curent maxim (A) | 2000 | |
| Aer de răcire ($m^3/s$) | 1,8 | |
| Izolație | clasa $F$ | |
| Raport transmitere (pentru $V = 120$ km/h) | 20 : 73 = 1 : 3,65 | |
| Diametrul roților motoare cu bandaj nou (mm) | 1250 | |

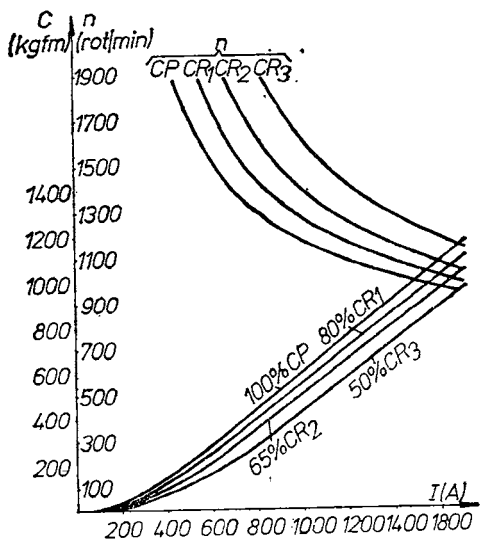



*Fig.5.36.* Caracteristicile $n(i)$, $C(I)$ ale motorului LJE-108.

Caracteristicile turației și cuplului în funcție de curent $n(I)$ și $C(I)$ sînt redate în figura 5.36. Raportarea la obadă a acestor caracteristici adică $V(I)$ și $F(I)$ sînt reprezentate în figura 5.37 și s-au calculat și trasat pentru diametrul roții semiuzat ($D = 1210$) și raportul de transmitere 1 : 3,65.

Pe diagrama din figura 5.37 $F(I)$ s-a trasat pentru întreaga locomotivă (6 motoare LJE — 108/1) și cîmp plin ($CP$) și trei trepte de cîmp redus ($CR_1$, $CR_2$, $CR_3$); curbele $V(I)$ s-au trasat pentru diverse trepte ale graduatorului marcînduse tensiunea în gol corespunzătoare la secundarul transformatorului (967 V corespunde la ultima treaptă a graduatorului cînd tensiunea pe motor este cea nominală 770 V), iar la ultima treaptă de tensiune s-au efectuat și cele trei trepte de cîmp redus ($CR_1$, $CR_2$, $CR_3$).

Diagrama din figura 5.37 servește la trasarea caracteristicei de tracțiune $F(V)$ — vezi capitolul 6-paragraf 6.

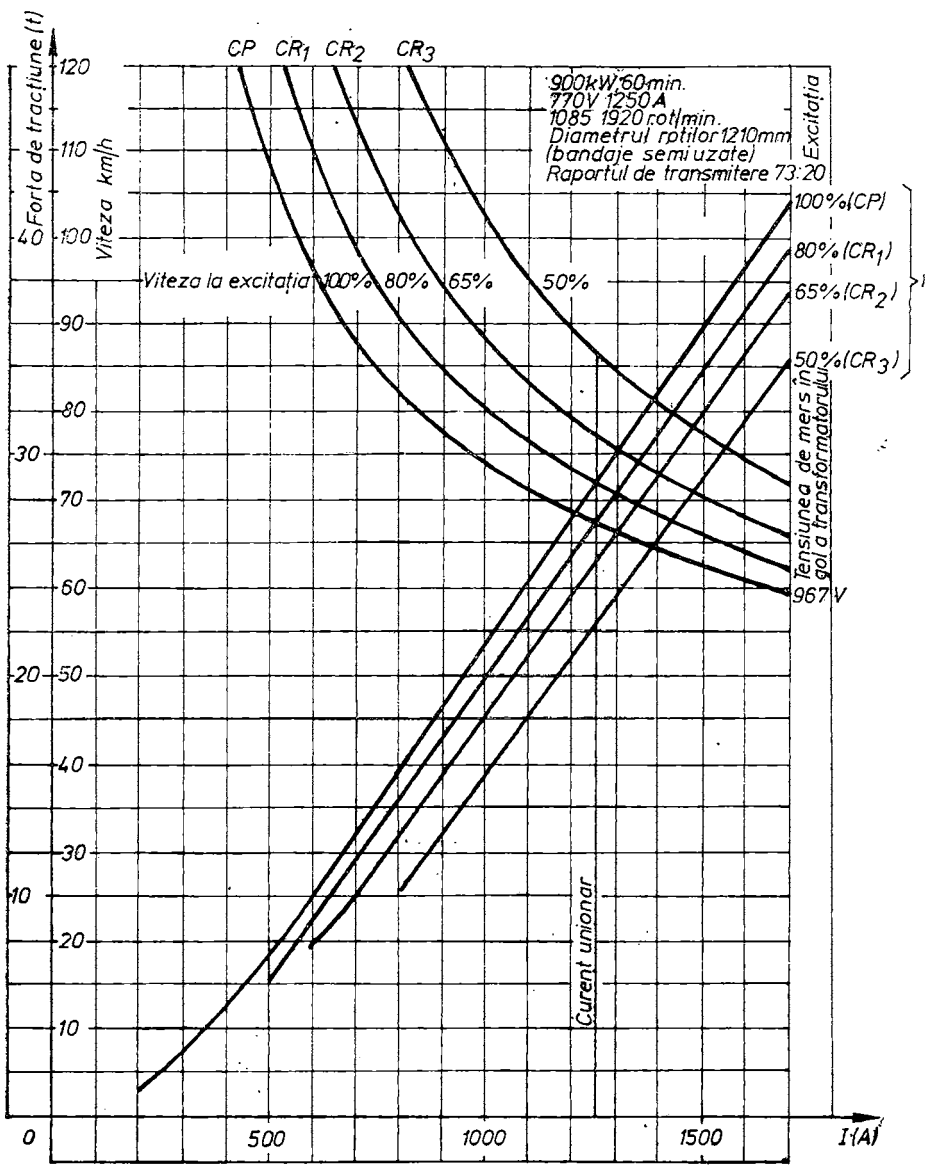



*Fig. 5.37.* Caracteristicile la obadă $V(I)$, $F(I)$ ale motorului LJE-108.

5.10.5. **Motorul de tensiune ondulată.** Dacă motorul de tracțiune se alimentează direct de la redresor, *fără însorierea unui self de aplatisare* (figura 5.38, *a*), atunci tensiunea la bornele sale prezintă aceeași ondulație ca tensiunea redresată (figura 5.38, *b*), de unde și denumirea de *motor de tensiune ondulată*.

Pentru ca pierderile în fier să rămînă în limite acceptabile, datorită ondulației mari a fluxului, carcasa motorului se execută din tole (nu masivă

din oțel turnat ca la motorul de curent ondulat); prin aceasta se mărește și inductivitatea circuitului. De asemenea este necesar ca și polii principali să fie executați din tole ca să prezinte o inductivitate sporită și în felul acesta preia o parte din funcțiunea selfului de aplatisare. Tot ca măsuri constructive, la motorul de tensiune ondulată se recurge la șuntarea permanentă

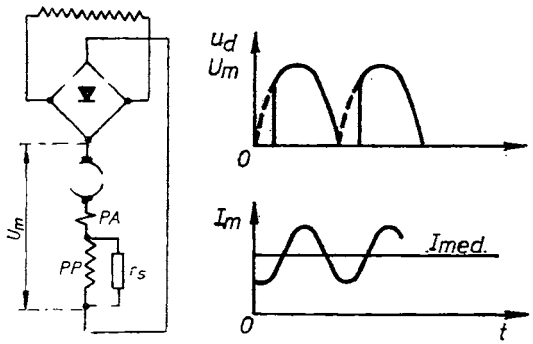



*Fig. 5.38.* Alimentarea motorului de tracțiune de către redresor, fără self de aplatisare în circuit : *a* — schema ; *b* — tensiunea redresată ; *c* — curentul redresat.

a polilor principali foarte mică, de ordinul 0,3%, pentru a nu diminua inductivitatea circuitului motorului, iar întreferul este mărit pentru a evita saturația lui.

Caracteristicile motorului de tensiune ondulată comparate cu ale motorului de curent ondulat sînt redate în diagramele din figura 5.39.

Caracteristica de mers în gol $E_c(I)$ se apropie de o dreaptă, a cuplului $C(I)$ de o parabolă (la motorul de curent ondulat caracteristica este parabolică pînă în domeniul $I = 20\%\ I_n$ după care devine rectilinie), iar caracte-

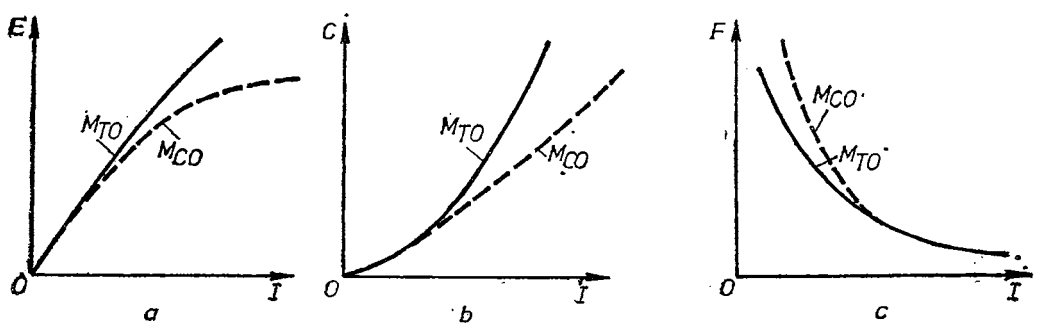



*Fig. 5.39.* Caracteristicile motorului de tensiune ondulată comparate cu cele ale motorului de curent ondulat : *a* —caracteristica de mers în gol ; *b* — caracteristica cuplului ; *c* — caracteristica forței de tracțiune ; $M_{TO}$ — motor de tensiune ondulată ; $M_{CO}$ — motor de curent ondulat.

ristica de tracțiune $F(V)$ se apropie de hiperbola $FV^2 = \text{ct}$ (la motorul de curent ondulat aceasta este valabilă în partea de jos a caracteristicii). Din cauza alurii mai culcate, utilizarea aderenței locomotivei este influențată negativ.

La motorul de tensiune ondulată, ondulația de curent evident este mai mare, de ordinul 40%.

În afara celor semnalate mai sus, față de motorul de curent ondulat sînt de evidențiat și următoarele:

— motorul de tensiune ondulată permite suprimarea selfului de aplatisare însă este mai voluminos și mai greu datorită intreferului mărit și a numărului sporit de amperspire;

— motorul de tensiune ondulată nu permite funcționarea la cîmp redus (trepte de șuntare) din cauza micșorării inductivității circuitului, iar pentru conservarea aceleiași game de utilizare a locomotivei trebuie sporită tensiunea nominală cu implicații asupra izolației motorului, implicit sporirea greutății și supradimensionarea grupului transformator-redresor;

— procesele tranzitorii, în special cele datorate desprinderii pantografului și repunerii imediate sub tensiune, care agravează comutația motorului sînt incomparabil mai bine suportate și atenuate de motorul de curent ondulat din cauza selfului de aplatisare.

Datorită acestor dezavantaje, motorul de tensiune ondulată nu s-a consacrat ca motor de tracțiune pe locomotivele monofazate cu redresoare.

## 5.11. REGLAREA VITEZEI PE PARTEA DE ÎNALTĂ TENSIUNE A TRANSFORMATORULUI

5.11.1. **Generalități.** După cum s-a arătat la reglarea locomotivei de curent continuu, variația vitezei se reduce la posibilitățile ce există de a regla turația motorului de tracțiune, conform relației motorului,

$$V = \frac{U - rI}{K\Phi}.$$

La locomotive de curent continuu, variația vitezei ($V$) se obține prin procedeele:

— variația tensiunii la bornele motorului de tracțiune ($U$), folosind metoda interconectării motoarelor de tracțiune (serie, serie-paralel, paralel);

— variația fluxului inductor ($\Phi$), prin șuntarea înfășurării de excitație, lucrînd cu motorul la cîteva trepte de cîmp redus;

— prin intercalarea de rezistențele ($R$) în circuitul motorului (reglaj reostatic).

La locomotivele de curent alternativ monofazat, problema se prezintă întrucîtva mai simplu, întrucît beneficiind de prezenta transformatorului, reglajul vitezei se obține în limite largi numai prin variația tensiunii pornind de la o valoare minimă pînă la valoarea ei nominală, iar pentru lărgirea domeniului de reglare, la ultima treaptă de tensiune se mai aplică și cîteva trepte de cîmp redus. Nu se mai practică nici reglaj reostatic și nici reducerea cîmpului la fiecare treaptă de tensiune.

Din ecuația de mers în gol a unui transformator $\frac{U_1}{U_2} = \frac{W_1}{W_2}$ rezultă că tensiunea de ieșire $U_2 = U_1 \frac{W_2}{W_1}$ se poate regla prin variația numărului

de spire ($W$) a înfășurărilor ($U_1$ fiind tensiunea primară de intrare constantă-tensiunea de la linia de contact, $U_{LC}$) și anume:

$U_2 = K_1 W_2$, unde $K_1 = \frac{U_1}{W_1} = \text{const.}$, $U_2$ se reglează prin variația spirelor înfășurării secundare ($W_2$), adică *reglajul pe joasă tensiune*, problemă tratată de locomotivele monofazate 16 2/3 Hz (vezi, cap. 3); $U_2 = K_2 \frac{1}{W_1}$, unde $K_2 = U_1 W_2 = \text{const.}$, $U_2$ se mai poate regla prin variația spirelor înfășurării primare ($W_1$), adică *reglarea pe înaltă tensiune* (sau reglajul pe înfășurarea primară a transformatorului). Această soluție cu reglarea pe înaltă tensiune este în prezent generalizată la locomotivele de curent monofazat cu redresoare. În ultima vreme reglarea pe înaltă tensiune se folosește și la locomotivele de curent monofazat 16 2/3 Hz, abandonîndu-se soluția cu reglarea pe joasă tensiune.

5.11.2. **Scheme de principiu și condițiile tehnice ale reglării tensiunii prin transformator.** Cea mai simplă schemă de reglare pe înaltă tensiune este redată în figura 5.40. Pentru creșterea tensiunii de ieșire $U_2$ trebuie deplasat cursorul $C$ de la dreapta spre stînga, pe înfășurarea primară ($a$) astfel ca numărul spirelor primare ($W_1$) să scadă $\left(\text{conform relației } U_2 = K_2 \frac{1}{W_1}\right)$. Obținerea lui $U_2$ nominal desigur se va obține cu cursorul în punctul $A$ (spre exemplu) cînd în circuit va trebui să rămînă un număr minim din spirele primare $W_1$ (adică $W_{OA}$). Scriind potențialele în diferitele puncte ale înfășurării primare rezultă:

$$\frac{U_{OA}}{U_{OB}} = \frac{W_{OA}}{W_{OB}}; \quad U_{OB} = U_{OA} \frac{W_{OB}}{W_{OA}} = U_{LC} \frac{W_1}{W_{OA}} \gg U_{LC}.$$

Întrucît numărul total de spire primare ($W_1$) este incomparabil mai mare decît numărul de spire rămase în circuit ($W_{OA}$) pentru realizarea lui $U_2$ nominal, rezultă că potențialul punctului $B$ al înfășurării primare este foarte mare în raport cu valoarea tensiunii liniei de contact ($U_{LC}$), ceea ce complică foarte mult și nejustificat construcția transformatorului din cauza izolării înfășurării primare la tensiunea rezultată. Din acest considerent această soluție nu este realizată în practică.

În mod curent la locomotivele de curent alternativ reglarea pe înaltă tensiune se realizează după principiul indicat în schema din figura 5.41, adică se introduce o înfășurare primară suplimentară secționată în prize de tensiune (1, 2, 3 ...), denumită înfășurare de reglare (sau înfășurare autotransformator — $AT$ — întrucît ea este construită și funcționează pe principiul autotransformatorului: între priza 1—0 se culege tensiunea $U_{1-0} = \frac{W_{1-0}}{W_{OB}} U_{OB}$; între priza 2—0 se culege tensiunea $U_{2-0} = \frac{W_{2-0}}{W_{OB}} U_{OB}$...).

Complicația constructivă a transformatorului prin introducerea înfășurării de reglare este mult avantajoasă față de soluția din figura 5.40, întrucît

ea este supusă la tensiunea din linia de contact (izolarea se realizează deci pentru 25 kV), iar tensiunea care se aplică la înfășurarea *b* rezultă prin deplasarea culegătorului (*GR*) de la stînga la dreapta și deci prin creșterea numărului de spire ale înfășurării primare, adică

$$U_b = \frac{W_{OC}}{W_{OB}} U_{OB} = K W_{OC}, \text{ unde } K = \frac{U_{LC}}{W_{AT}} = \text{const.}$$

Raportul de transformare al transformatorului *b*, *c* fiind constant rezultă că tensiunea de ieșire (secundară) $U_2$ se variază prin deplasarea culegătorului

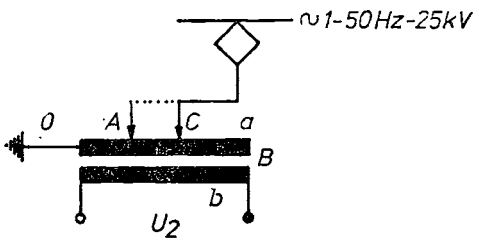



*Fig. 5.40.* Schema reglării pe înaltă tensiune.

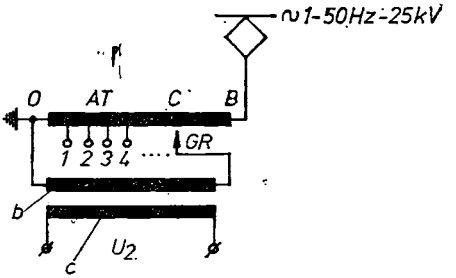



*Fig. 5.41.* Schema reglării pe înaltă tensiune, cu înfășurare specială de reglare.

*GR* pe prizele 1, 2, 3 ...; valoarea $U_{2nom}$ se obține cu culegătorul pe ultima priză de tensiune de pe înfășurarea de reglare.

Avantajele principale oferite de reglarea pe înaltă tensiune față de reglarea pe joasă tensiune sînt următoarele:

— datorită numărului mare de spire ale înfășurării de reglare, alegerea tensiunii pentru fiecare priză se face mult mai ușor;

— reglarea sub sarcină, pe înaltă tensiune conduce la a comuta curenți de ordinul a sute de amperi, comparativ cu reglarea pe joasă tensiune unde curenții sînt de ordinul a mii de amperi ceea ce duce la complicații mari asupra aparatajului de comutație și cablajului;

— culegătorul de curent (*GR*) fiind plasat înaintea transformatorului redresoric (*b*, *c*), construcția și funcționarea lui nu este influențată de schema de montaj a redresorului.

Condițiile ce trebuie să fie îndeplinite la reglare (trecerea de la o treaptă de tensiune la alta) sînt aceleași ca și la reglarea pe joasă tensiune, adică:

— trecerea de la o treaptă de reglare la alta trebuie să se facă fără întreruperea curentului din circuitul de forță;

— în timpul trecerii de la o poziție la alta nu trebuie să se scurtcircuiteze net (pe o rezistență zero) secțiunea de spire a înfășurării de reglare care asigură sporul de tensiune corespunzător prizei respective. În acest scop pe pozițiile de trecere se introduce în circuit o „rezistență de trecere". La reglajul pe înaltă tensiune pentru tranziție se alege o rezistență și este posibil acest lucru datorită performanțelor culegătorului folosit și ale cărui contacte se dimensionează la valoarea curenților ce se comută; la reglajul pe joasă tensiune, așa cum s-a arătat, impedanța de tranziție trebuie să fie o bobină.

Schema cea mai simplă pentru reglare este dată în figura 5.42, unde s-au folosit contactori de priză $K_1$, $K_2$ ... și s-a notat cu $U_1$ tensiunea primară minimă și $\Delta U_1$ sporul de tensiune între două prize consecutive.

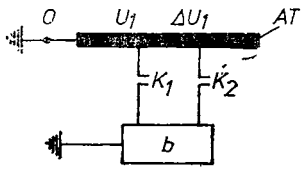



*Fig. 5.42.* Schema reglării pe înaltă tensiune, cu contactoare de priză.

Realizarea primei trepte de reglare ($I$) se obține cu $K_1$ — închis, $K_2$ — deschis, cînd tensiunea la sarcină va fi $U_b = U_1$.

A doua treaptă ($II$) se obține prin $K_2$ — închis, $K_1$ — deschis, iar $U_b = U_1 + \Delta U_1$.

Dacă pentru obținerea treptei $II$, mai întîi $K_1$ — se deschide și apoi $K_2$ — se închide, s-a întrerupt curentul și nu s-a îndeplinit prima condiție de trecere; dacă $K_1$ — se menține închis, $K_2$ — se închide și apoi $K_1$ — se deschide, în perioada cînd cei doi contactori sînt închiși secțiunea de spire cuprinsă între cele două prize este scurtcircuitată net și nu s-a îndeplinit cea de-a doua condiție de trecere.

În scopul îndeplinirii simultane a ambelor condiții de trecere, schema se complică în sensul introducerii a cel puțin un contactor suplimentar și a unei rezistențe de trecere, ca în figura 5.43.

Treapta $I$ rezultă ca în schema *a*) cu $K_1$ — închis și $U_b = U_1$.

Treapta $II$ rezultă ca în schema *d*) cu $K_2$ — închis, $K_3$ — închis, iar $U_b = U_1 + \Delta U_1$.

Pozițiile *b*) și *c*) sînt intermediare de trecere necesar a fi făcute pentru îndeplinirea simultană a condițiilor impuse mai sus:

— în poziția *b*) se închide și $K_2$ cînd spirele dintre cele două prize se scurtcircuitează însă cu introducerea în circuit a rezistenței de trecere $r$ care are

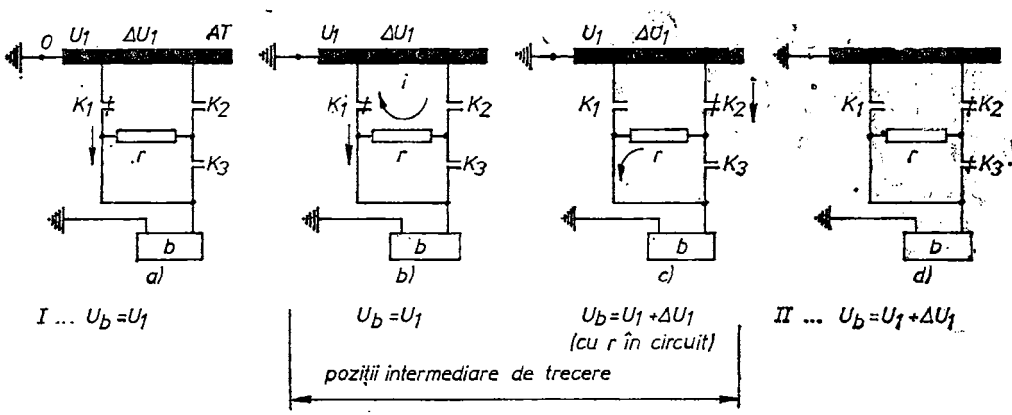



*Fig. 5.43.* Schema reglării cu contactoare de priză și rezistență de trecere.

drept efect limitarea curentului $i$ de scurtcircuit; în acest mod se asigură integritatea transformatorului. Curentul principal nu s-a întrerupt (sensul este indicat cu săgeata plină).

— în poziția *c*) se deschide $K_1$ cînd curentul de tracțiune circulă prin $r$ (el va avea o variație $\Delta I$ ce depinde de valorile lui $\Delta U_1$ și $r$), iar $U_b = U_1 + \Delta U_1$.

Următoarele trepte de reglare se obțin după același procedeu de mai sus și vor fi: *III* ... $U_b = U_1 + \Delta U_1 + \Delta U_1 = U_1 + 2\Delta U_1$; *IV* ... $U_b = U_1 + 3\Delta U_1$...

Pentru a se putea obține un reglaj cît mai fin al tensiunii pe motor sînt necesare multe prize de tensiune. În mod curent la locomotivele monofazate cu redresoare se utilizează 30—40 trepte de reglare ceea ce ar conduce la o complicație constructivă a schemelor cu contactoare de priză care devine voluminoasă și contactoarele slab utilizate (unul sau două contactoare pe treaptă). În locul acestei soluții, pentru reglarea pe înaltă tensiune sub sarcină, culegerea treptelor de tensiune se face folosind un dispozitiv denumit în mod uzual „graduator" (culegătorul pe înaltă tensiune).

Diversele tipuri de graduatoare existente diferă între ele după modul de realizare a contactelor, numărul contactoarelor de trecere, dispozitivul de acționare ... Multe locomotive de curent monofazat ((inclusiv cele din parcul C.F.R.) sînt echipate cu graduator tip *BBC* sau *ASEA*; pentru exemplificare se prezintă aceste două tipuri.

5.11.3. **Reglarea pe înaltă tensiune cu graduator tip BBC.** Toate elementele constructive ale graduatorului sînt plasate într-o carcasă de metal ușor, în ulei și, împreună cu dispozitivul de acționare și întreruptoarele de sarcină în aer, formează o unitate constructivă independentă, care se atașează transformatorului principal. Datele tehnice ale graduatorului sînt:

— tensiunea nominală . . . . . 25 kV;
— tensiunea de încercare . . . . . 75 kV, 50 Hz;
— curentul nominal . . . . . .400 A;
— greutatea în serviciu . . . . . .400 kg.

La realizarea constructivă a diverselor elemente trebuie să se țină seama că locomotivele au un mare grad de utilizare și deci reviziile au loc la intervale mari, iar un graduator execută zilnic circa 20 000 manevre. Schema de principiu a graduatorului este prezentată în figura 5.44.

Segmenții 0, 1, 2 ... 32 ai culegătorului de înaltă tensiune 2 sînt legați electric cu prizele de tensiune respective 0, 1, 2 ... 32 ale înfășurării (*a*) a transformatorului.

În consecință, atunci cînd graduatorul se află pe priza 32, tensiunea aplicată la transformatorul redresoric este egală cu tensiunea liniei de contact (de exemplu $U_{LC} =$ = 25kV); cînd graduatorul va fi pe priza *1*, tensiunea aplicată la

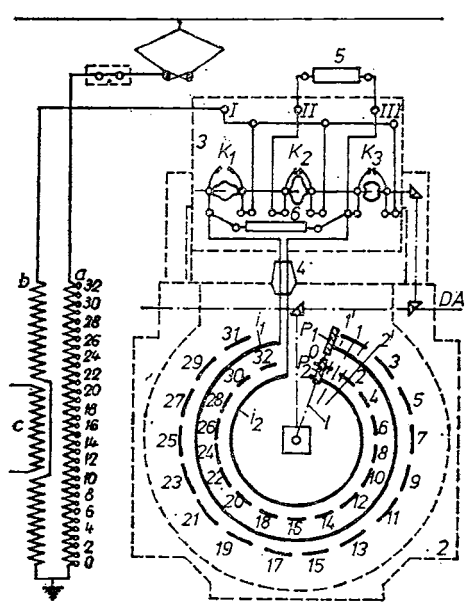



*Fig. 5.44.* Schema de conexiune a graduatorului tip B.B.C.

transformatorul redresoric va fi $\frac{1}{32} U_{LC}$, pe priza *2* va fi $\frac{2}{32} U_{LC}$, ... pe priza 32 va fi $\frac{32}{32} U_{LC}$.

Cînd rola de contact $P_1$ calcă pe segmentul *1*, prin inelul de culegere $i_1$ și contactorul $K_1$ (închis), se aplică la înfășurarea *b* a transformatorului redresoric tensiunea corespunzătoare între priza *1* și masă (pămînt).

Prin aceleași elemente se aplică tensiunile corespunzătoare și celorlalte trepte fără soț adică 3, 5, 7...

Cînd rola de contact $P_2$ calcă pe segmentul *2*, prin inelul de culegere $i_2$ și contactorul $K_3$ (închis) se aplică la înfășurarea *b* a transformatorului redresoric tensiunea corespunzătoare între priza *2* și masă. Prin aceleași elemente se aplică tensiunile corespunzătoare și celorlalte trepte cu soț adică 4, 6, 8...

Rolele de contact $P_1, P_2$ sînt legate mecanic între ele și acționate deci simultan de levierul *l*, așa că atunci cînd rola $P_1$ calcă segmentul *1* și inelul $i_1$, rola $P_2$ nu face contact electric, ea găsindu-se în intervalul dintre segmentul *0* și *2*. Aceleași considerente și pentru poziția rolei comparativ $P_2$ cu $P_1$. Pentru situația cînd rolele de contact $P_1$, $P_2$ calcă simultan pe segmenții corespunzători *1, 2*, adică așa-numitele poziții de trecere notate în schemă prin *1'. 2'...*, se produce scurtcircuitarea spirelor corespunzătoare ale înfășurării transformatorului *a*. Pozițiile de trecere sînt necesare pentru a nu întrerupe alimentarea (curentului principal), iar diminuarea efectelor scurtcircuitării (limitarea curentului de scurcircuit) se face prin rezistența — șunt *6* de mare valoare ohmică, iar contactorul $K_2$ înseriază suplimentar în circuit rezistența ohmică *5*.

Modul de realizare a treptelor de reglare (de tensiune) atît pare (trecerea de la o treaptă fără soț la una cu soț) cît și cele impare (trecerea de la o treaptă cu soț la una fără soț) este prezentat în schemele desfășurate din figura 5. 45.

Schema notată *I* reprezintă poziția *1* de mers, realizată prin peria $p_1$, inelul de contact $i_1$, $K_1$-închis, iar tensiunea de ieșire va fi aceea corespunzătoare prizei de tensiune *1*, adică $U_b = U_1$.

În poziția *1*) — poziție intermediară de trecere — se închide și $K_2$, iar ambele perii călcînd pe ploturi conducătoare se scurtcircuitează secțiunea de spire *1 — 2* a transformatorului; curentul de scurtcircuit *i* este însă limitat prin rezistența de trecere *r* introdusă în circuit, curentul din circuitul principal nu s-a întrerupt (sensul este figurat cu săgeată plină); tensiunea de ieșire va fi $U_b = U_1$.

În poziția *2*) — tot poziție intermediară de trecere — se deschide $K_1$, peria $p_2$ se deplasează pe platoul de contact (*2*), iar $p_1$ pe interstițiul izolat; curentul din circuit va circula prin *r* (variația lui $\Delta I$ depinde de valorile $\Delta U_1$ și *r*); tensiunea de ieșire va fi $U_b = U_1 + \Delta U_1$ (cu *r* în circuit).

Poziția *II*, cînd se închide $K_3$ (se scurtcircuitează *r*) reprezintă poziția *II* de mers cu tensiunea la ieșire $U_b = U_1 + \Delta U_1$.

Toate trecerile pare (*I—II, III—IV, V—VI* ...) se efectuează în același mod descris mai sus.

Toate trecerile impare (*II—III, IV—V, VI—VII* ...) se realizează după schemele *II—3—4—III* a căror funcționare se descifrează pe principiul enunțat mai sus.

De notat că între două prize de tensiune consecutive *1—2, 2—3, 3—4* ··· rația de tensiune este aceeași $\Delta U_1$ (de ordinul zeci de volți la construcțiile existente), din considerente de a simplifica din punct de vedere constructiv secționarea înfășurării de reglare a transformatorului.

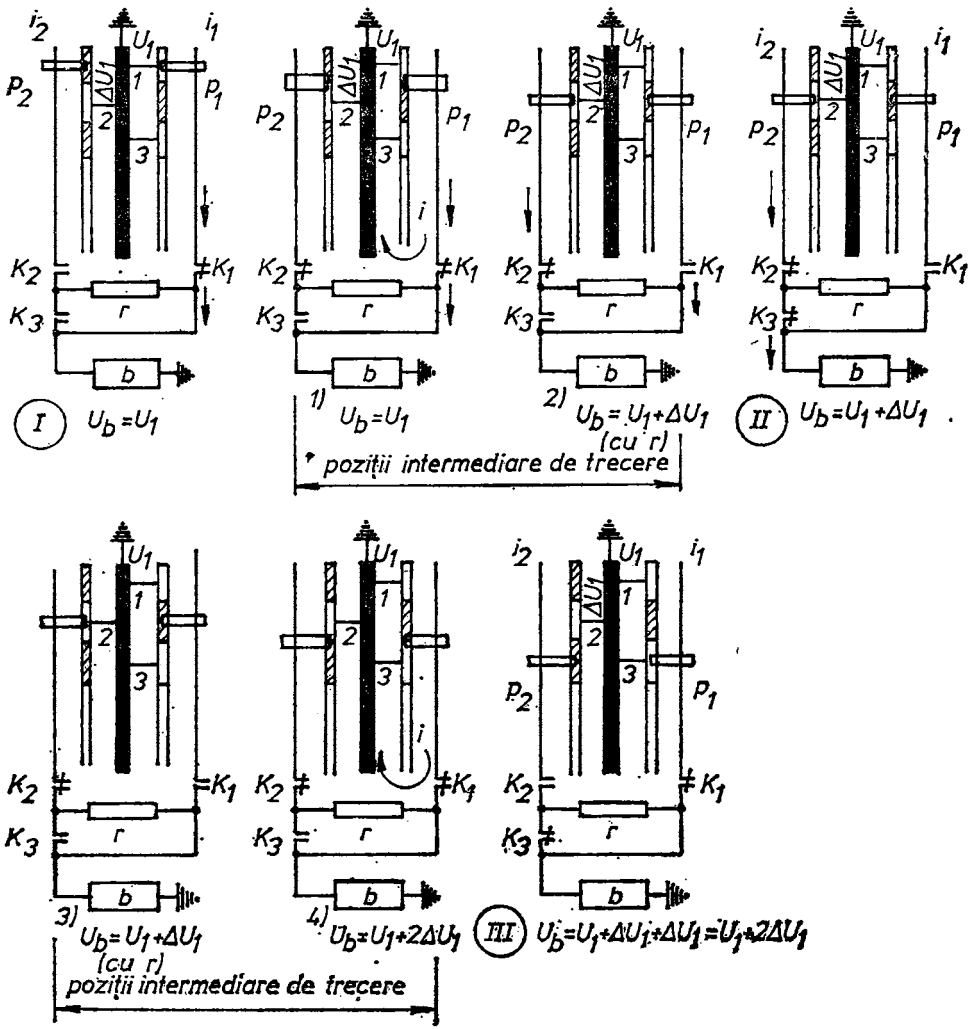



*Fig. 5.45.* Modul de realizare a treptelor de tensiune cu graduator B.B.C.

Dispozitivul de acționare a graduatorului este un servomotor pneumatic comandat prin supape electropneumatice. Schema cinematică a acționării este prezentată în figura 5.46.

Servomotorul transmite mișcarea la arborele cotit $Ac$, care antrenează simultan axul cu came $Ax—c$ al contactoarelor $K_1$, $K_2$, $K_3$ (într-o anume succesiune), și la levierul $l$, care deplasează rolele de contact $P_1$, $P_2$. La fiecare comandă, arborele cotit se rotește cu 90°; o rotire completă a arborelui cotit

conduce la deplasarea selectorului pe patru prize de tensiune, așa că, utilizînd un asemenea dispozitiv de acționare, numărul treptelor de tensiune va trebui să fie multiplu de 4.

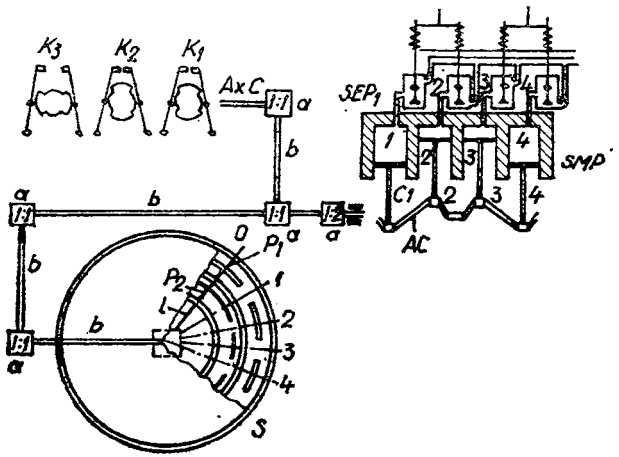



*Fig. 5.46.* Schema cinematică a dispozitivului de acționare a graduatorului: *SMP* — servomotor pneumatic; *SEP* — supape electropneumatice; $C_{1,2,...}$ — cilindrii servomotorului; *a* — angrenaje conice; *b* — bare de transmisie.

Pentru rotirea selectorului în sens invers, se excită supapele electropnuematice în sens invers.

Întreg ansamblul dispozitivului de acționare este astfel construit, încît asigură un timp de punere în circuit pentru o treaptă de tensiune de 0,3 s, ceea ce conduce la 10 s pentru realizarea celor 32 trepte complete ale graduatorului.

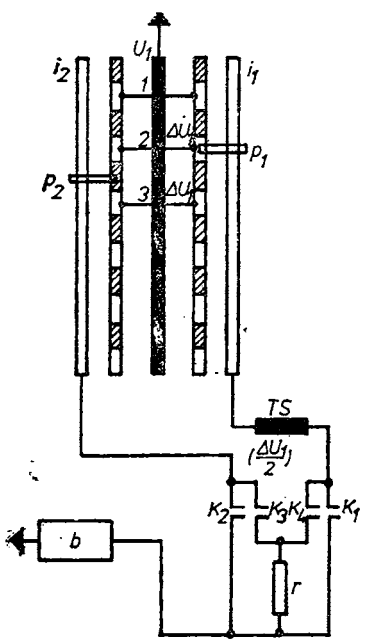



*Fig. 5.47.* Schema de conexiuni a graduatorului tip ASEA.

5.11.4. **Reglarea pe înaltă tensiune cu graduator tip ASEA.** Față de graduatorul *BBC* prezentat mai sus, graduatorul *ASEA* prezintă următoarele particularități:

— are patru contactoare de lucru și tot o rezistență de trecere, pentru realizarea treptelor de reglare;

— o aceeași priză de tensiune a înfășurării de reglare este legată la două ploturi de contact;

— prezintă o înfășurare suplimentară la transformator (un transformator survoltor), care aplică un salt de tensiune $\frac{\Delta U_1}{2}$ atunci cînd este introdus în circuit de către numai una și aceeași perie de contact;

— periile de contact au mișcare alternată și sacadată (nu simultană ca la graduatorul *BBC*).

Schema constructivă de principiu este prezentată în figura 5.47.

Cînd peria $p_2$ vine în contact cu un plot aferent, de exemplu priza de tensiune $n$, tensiunea transmisă sarcinii (în speță la înfășurarea „$b$" a transformatorului redresoric) va fi $U_b = U_1 + n\Delta U_1$; în momentul cînd peria $p_1$ vine în contact cu plotul aceleiași prize de tensiune $n$, tensiunea transmisă la sarcină va fi $U_b = U_1 + n\Delta U_1 + \frac{\Delta U_1}{2}$. În acest mod prin scoaterea a „$n$" prize de tensiune la înfășurarea de reglare se obțin $2n$ trepte de reglare adică un număr dublu de poziții de mers; din această cauză graduatorul *ASEA* conduce la o schemă de reglare cu „dublă treaptă" (și transformator survoltor *TS*), comparat cu graduatorul *BBC* care este de tipul „monotreaptă".

Din schema desfășurată (fig. 5.48) rezultă și modul cum se realizează treptele de reglare.

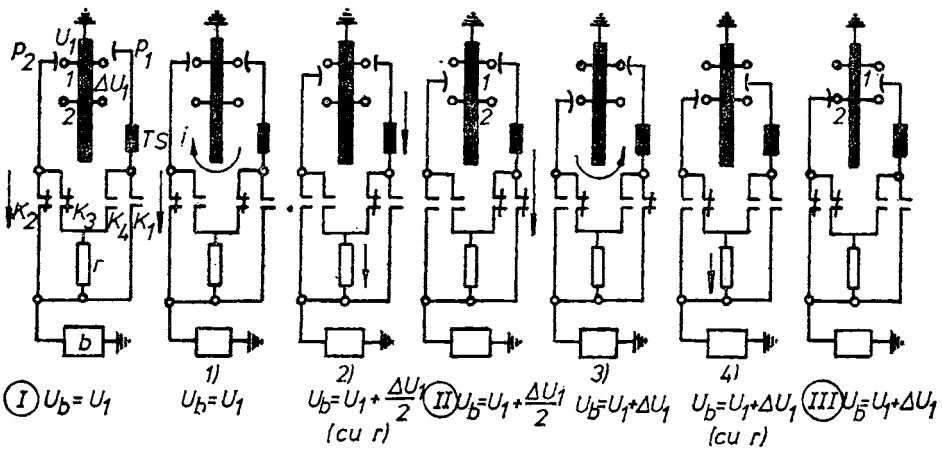



*Fig. 5.48.* Modul de realizare a treptelor de tensiune cu graduatorul ASEA.

Treapta *I* se obține cu $p_2$ pe priza *1* ($p_1$ este pe porțiune izolată) și $K_2$, $K_3$ — închiși; tensiunea la sarcină va fi $U_b = U_1$.

Pozițiile *1)* și *2)* sînt de trecere; în poziția *1)* se deschide $K_3$, culegătorul $p_1$ se deplasează și intră în contact cu priza *1* (contactul se face fără curent întrucît $K_1$, $K_3$ — deschise), se închide apoi $K_4$ care limitează curentul de scurtcircuit $i$ prin $r$; în poziția *2)* se deschide $K_2$, iar $p_2$ avansează pe porțiunea izolată cînd $U_b = U_1 + \frac{\Delta U_1}{2}$ ( a intrat în circuit *TS* care survoltează cu $\frac{\Delta U_1}{2}$ ) iar curentul circulă prin $r$ avînd un salt $\Delta I$ care depinde de valorile $\frac{\Delta U_1}{2}$ și $r$.

Treapta *II* se obține prin închiderea lui $K_1$ cînd tensiunea la sarcină $U_b = U_1 + \frac{\Delta U_1}{2}$.

Toate trecerile pare se obțin în modul descris mai sus; toate trecerile impare rezultă ca în schemele *II, 3, 4, III*.

Valorile tensiunilor care rezultă pe fiecare poziție de mers se deduc din figura 5.48 și anume:

$$I \ldots U_b = U_1;\ II \ldots U_b\ U_1 + \frac{\Delta U_1}{2};\ III \ldots U_b = U_1 + \Delta U_1;\ IV \ldots U_b = U_1 + \Delta U_1 + \frac{\Delta U_1}{2} \ldots$$

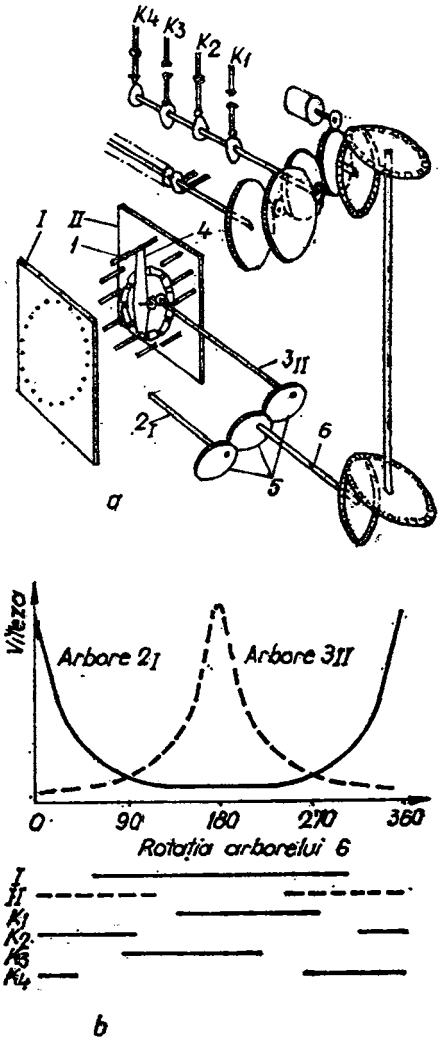



*Fig. 5.49.* Schema cinematică a dispozitivului de acționare a graduatorului: *a* — schema cinematică; *b* — diagrama vitezelor de rotație ale culegătoarelor în funcție de rotația arborelui de antrenare.

Schema cinematică a dispozitivului de acționare a graduatorului *ASEA* este redată în figura 5.49.

Culegătorul de înaltă tensiune este realizat cu două pîrghii *4*, ale căror contacte sînt apăsate alternativ pe bolțurile de contact *1* așezate între plăcile izolante *I, II*. Pentru cinematica alegerii treptate a contactoarelor este utilizat un excentric și o pîrghie cu angrenaje. Graduatorul lucrează fără contacte de alunecare și deci uzura mecanică este redusă. Mișcarea neuniformă care este necesară atunci cînd o pîrghie de contact este deplasată repede de la un bolț la altul, în timp ce cealaltă este în repaus, se realizează cu ajutorul unei transmisii cu roți eliptice *5*. Ambele pîrghii de contact se mișcă în permanență în timpul procesului de conectare.

În figura 5.49 sînt arătate vitezele diferite cu care sînt rotite axele $2_I$, $3_{II}$ ale pîrghiilor de contact, în funcție de viteza uniformă a arborelui de acționare *6*, cît și de ritmul de conectare al celor două pîrghii de contact și de cel al contactoarelor de sarcină $K_1 \cdots K_4$.

Culegătorul de înaltă tensiune este montat într-o carcasă cu ulei etanșă și este atașat transformatorului.

Dispozitivul de acționare al graduatorului este un electromotor cuplat la axul de antrenare.

## 5.12. TRANSFORMATORUL

5.12.1. **Elemente constructive şi funcţionale.** Transformatorul este agregatul cu dimensiunile gabaritice cele mai mari, avînd greutatea cea mai mare, însumează puterea totală a locomotivei (motoare de tracţiune, servicii auxiliare, încălzirea electrică a trenului) şi îndeplineşte în principal funcţia de coborîre a tensiunii şi de reglare a tensiunii aplicate la motoarele de tracţiune. În cazul locomotivelor monofazate 25 kV-50 Hz cu reglarea pe înaltă tensiune şi redresoare cu diode, datorită complexităţii funcţionale ce trebuie asigurată, transformatorul necesită mai multe înfăşurări (vezi fig. 5.1; înfăşurarea de reglaj-autotransformatorul; transformatorul de tracţiune cu secundar divizat în atîtea părţi cîte motoare are locomotiva; transformator de încălzire şi servicii auxiliare; transformator pentru alimentarea excitaţiilor (în caz de frînă electrică ...) care implicit conduce la o complicaţie constructivă în sensul că este vorba de mai multe transformatoare monofazate realizate într-un singur agregat compact.

Din punct de vedere constructiv transformatoarele diferă după numărul şi forma miezului magnetic (manta, cu două sau trei coloane ...) şi modul de realizare a bobinajelor.

În figura 5.50 s-a prezentat dispoziţia circuitului magnetic al transformatorului LE-060-EA (CFR) şi care corespunde schemei electrice din figura 5.1.

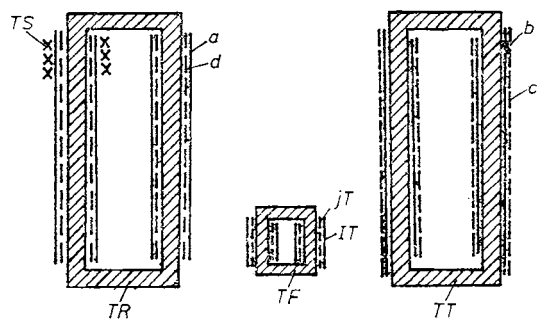



*Fig. 5.50.* Miezurile magnetice şi dispunerea înfăşurărilor transformatorului LE — 060 —EA (CFR): *TR*— transformatorul de reglaj; *TT*—transformatorul de tracţiune; *TF*— transformatorul de frînare.

Se observă că transformatorul este conceput cu trei miezuri magnetice independente, fiecare miez cu cîte două coloane; de fapt sînt trei transformatoare incluse într-o singură cuvă. Pe miezul transformatorului de reglare (*TR*) sînt dispuse: înfăşurarea de reglare (*a*) cu prizele de tensiune; înfăşurarea de încălzire a trenului (*d*) pe care sînt practicate şi cîteva prize de tensiune pentru alimentarea serviciilor auxiliare; înfăşurarea transformatorului survoltor (*TS*), cîteva spire, a graduatorului *ASEA*. Transformatorul de tracţiune (*TT*) este realizat pe un miez separat avînd înfăşurarea primară (*b*) şi secundarul (*c*) secţionat în şase părţi (cîte una de fiecare motor). Pentru alimentarea excitaţiilor separate ale maşinilor cînd funcţionează în regim de generator pentru frîna reostatică se foloseşte transformatorul de frînare (*TF*) cu înfăşurările de înaltă (*IT*) şi joasă tensiune (*jT*).

Schema de conexiuni a înfăşurărilor (inclusiv legăturile între diversele transformatoare) ale ansamblului transformator al LE-060-EA este prezentată în figura 5.51. În scopul simplificării legăturilor şi reducerea numărului de ieşiri din transformator, graduatorul se fixează pe cuva transformatorului.

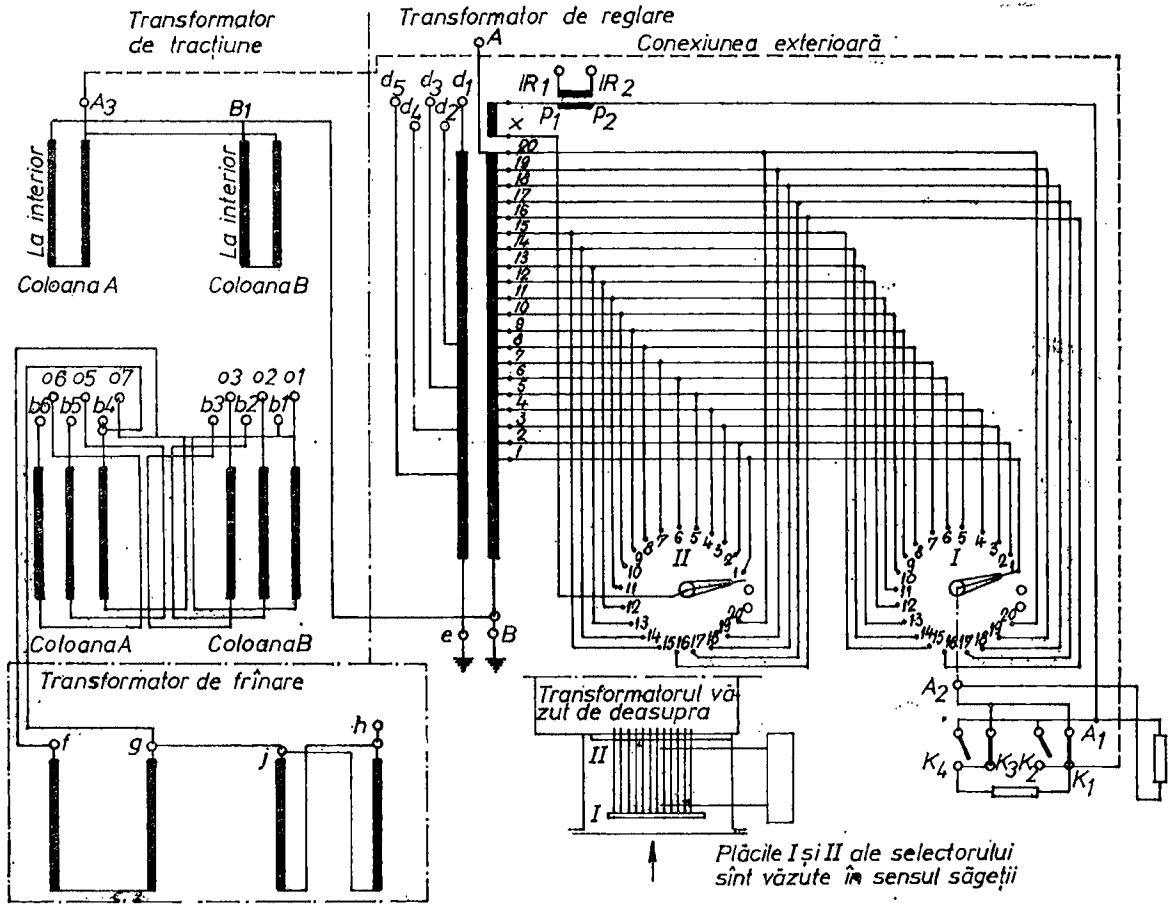



*Fig. 5.51.* Schema de conexiuni a transformatorului cu graduatorul (LE — 060 — EA).

Transformatorul trebuind să asigure atît puterea pentru tracțiune, a serviciilor auxiliare cît și încălzirea electrică a trenului, rezultă de putere mare (mii KVA) care însă trebuie să aibă dimensiuni și greutate reduse pentru a putea fi instalat pe locomotivă în gabaritul avut la dispoziție. În acest scop la dimensionare, densitatea de curent în bobinaje se admite către limita maximă 4—4,5 A/mm² (față de 2—2,5 A/mm² cît se admite la transformatoarele de uz general) ceea ce conduce la un regim termic ridicat și impune un sistem de răcire special al transformatorului. Răcirea se face cu circulația forțată a uleiului și răcirea acestuia într-un radiator răcit de asemenea forțat de un ventilator (fig. 5.52).

Circulația forțată a uleiului este asigurată de pompa de ulei (*PU*), iar debitul de ulei este reglat în funcție de temperatură de un releu (*RR*). Radiatorul (*R*) este fixat pe cuva transformatorului.

Verificarea regimului termic al transformatorului este o probă obligatorie cu ocazia încercărilor de tip a locomotivei (încercare ce se execută în exploatare pe un exemplar, înainte de dare în exploatare a unei serii de locomotive de construcție dată).

Normele internaționale (IEC Nr. 165/1969) prescriu supratemperatura maximă de 65°C a uleiului transformatorului la proba de regim uniorar sau regimul de durată a locomotivei (pentru cazul uzual cînd se folosește izolant din clasa *A* la realizarea înfășurărilor transformatorului).

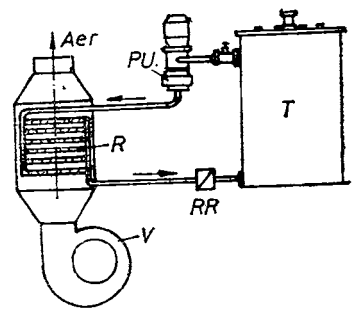



*Fig. 5.52.* Schema răcirii transformatorului: *T* — transformator; *R* — răcitor serpentine prin care circulă uleiul din cuva transformatorului); *V* — ventilator; *PU* — pompa de ulei; *RR* — releu pentru reglarea debitului de ulei.

5.12.2. Determinarea treptelor de tensiune la bornele motorului de tracțiune și corespunzător a prizelor de tensiune la înfășurarea de reglare a transformatorului. În cele de mai jos se prezintă o metodă simplă grafo-analitică.

Ecuația vitezei unui motor de curent continuu pentru parametrii săi nominali ($U_n$, $I_n$) este cunoscută:

$$V = \frac{U_n - rI_n}{K\Phi_{(n)}}. \tag{1}$$

Dacă se menține curentul ($I_n$ deci și $\Phi_{(n)}$) și se schimbă tensiunea pe motor ($U_x$), ecuația (1), devine:

$$V_x = \frac{U_x - rI_n}{K\Phi_{(n)}}. \tag{2}$$

Împărțind relațiile (1) și (2) rezultă:

$$V_x = V\,\frac{U_x - rI_n}{U - rI_n}, \tag{3}$$

care arată dependența $V_x(U_x)$, care este o dreaptă și a cărei construcție se face după diagrama din figura 5.53:

— se trasează în cadranul *1* caracteristica motorului $V(I)$ pentru $U_n$ și cîmp plin;

— din ecuația (3) $V_x = 0$, pentru $U_x - rI_n = 0$, adică $U_x = rI_n$ ceea ce determină punctul $A(rI_n, 0)$ de pe dreapta $V_x(U_x)$;

— al doilea punct de pe aceeași dreaptă $(B)$ rezultă prin determinarea lui $V$ (ridicînd verticala în punctul $I_n$) și ridicînd o verticală la $U_n$, adică $B(U_n, V)$;

— dreapta $AB$ este reprezentarea grafică a ecuației (3), adică $V_x(U_x)$.

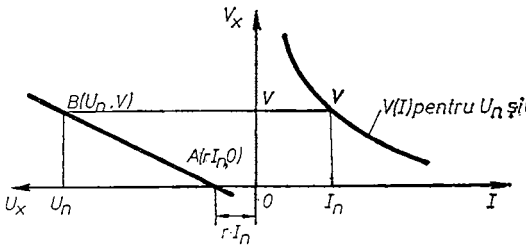



*Fig. 5.53.* Dependența vitezei motorului serie de tensiunea aplicată la borne.

A regla pe $U_x$ în mod continuu înseamnă a dispune de o infinitate de prize de tensiune la transformator, ceea ce nu este posibil și de aceea în mod practic se admite o reglare în trepte a tensiunii funcție de limitele de variație admise pentru curentul motorului astfel ca transmiterea forței de tracțiune să nu prezinte șocuri neadmise. În acest sens, practic se admite o variație a curentului în jur de $\pm$ 10% $I_n$, iar pentru acest ecart de curent, diagrama treptelor de tensiune se calculează și trasează ca în figura 5.54 și anume:

— Pe caracteristica $V(I)$ a motorului la $U_n$ și $CP$ se marcă cei doi curenți limită:

$I_1 = 0{,}9\ I_n$ și $I_2 = 1{,}1\ I_n$ pentru care rezultă cele două viteze $V_1$ și respectiv $V_2$;

— Orizontalele duse prin $V_1$ și $V_2$ cu verticala ridicată la valoarea $U_n$ determină punctele $B_1$, $B_2$ de pe dreptele limită $V(U)$ corespunzînd celor doi curenți admiși ca oscilație. Punctele $A_1$ și $A_2$ rezultă la scară: $A_1\ (rI_1, 0)$ $A_2(rI_{2.0})$ care unite cu $B_1$ și respectiv $B_2$ determină dreptele limită de tensiune pentru oscilațiile impuse curentului $I_1$ și $I_2$;

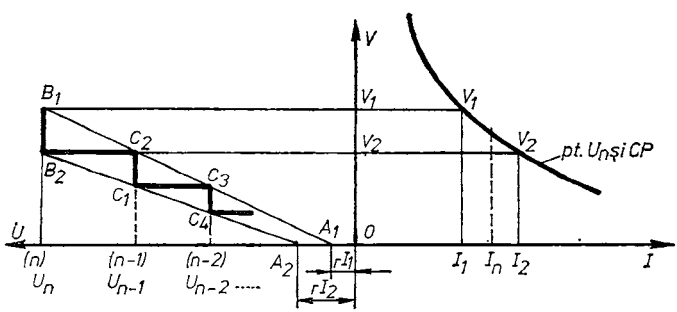



*Fig. 5.54.* Determinarea numărului și valoarea treptelor de tensiune aplicată motorului de tracțiune.

— Se construiește zigzagul $B_2 - C_2 - C_1 - C_3 \ldots$ Verticala $B_1 - B_2$ determină treapta de tensiune „$n$" (ultima) pe motor, adică $U_n$(parametru cunoscut al motorului de tracțiune). Verticala $C_2 - C_1$, determină treapta $n-1$, iar valoarea corespunzătoare a tensiunii $(U_{n-1})$ se citește la scară pe abscisa $OU$.

Verticala $C_{3-4}$ determină treapta $n-2$ și valoarea corespunzătoare a tensiunii $(U_{n-2})$; construcția diagramei se continuă ca mai sus pînă la prima treaptă de tensiune și valoarea ei $U_1 = rI_1$.

La construcția diagramei (fig. 5.54) se recomandă scările: pentru $U$, 10 mm = 20 V; pentru $I$, 10 mm = 100 A; pentru $V$, 10 mm = 5 km/h.

Datorită convergenței dreptelor de limitare $A_1B_1$, $A_2B_2$ rezultă că diferența de tensiune dintre două trepte de tensiune consecutive nu va fi aceeași (scade pe măsură ce se ajunge spre treapta *1*), ceea ce ar impune și diferențe de tensiune $\Delta U_1$ între două prize ale înfășurării de reglare a transformatorului diferite. Din punct de vedere constructiv al realizării înfășurării de reglare, prizele de tensiune se scot la număr egal de spire, deci rezultă $\Delta U_1$ același și ca atare și la motor diferența de tensiune între două trepte va fi constantă. Așadar metoda de mai sus dă o indicație orientativă asupra numărului și valorilor treptelor de tensiune la motor și formează baza de pornire pentru determinarea practică a treptelor de tensiune la înfășurarea de reglare a transformatorului.

În funcție de tipul graduatorului folosit (monotreaptă sau bitreaptă) și de numărul treptelor de tensiune pe motor, stabilit ca mai sus, pentru determinarea treptelor de tensiune la înfășurarea de reglare se procedează în modul următor:

— Admitem că numărul orientativ al treptelor de tensiune pe motor, determinat ca mai sus, a rezultat $z = 35$ și folosim graduator *ASEA* de tipul bitreaptă. Ne alegem 20 prize de tensiune la înfășurarea de reglare pentru care vor rezulta $z = 40$ trepte de reglare (20 trepte directe și 20 trepte intermediare cînd lucrează transformatorul survoltor *TS* — vezi fig. 5.47);

— Dacă $U_m$ este tensiunea nominală a motorului și $z$ numărul treptelor de tensiune pe motor, rația de tensiune între două trepte de tensiune consecutive va fi: $\Delta U_m = \frac{U_m}{z}$;

— Notînd cu $U_2$ tensiunea eficace în gol la secundarul transformatorului redresoric, corespunzătoare situației cînd pe motor se aplică $U_m$ (pentru calculul lui $U_2$ din $U_m$ cunoscut — vezi paragraful 12.3) raportul de transformare al transformatorului redresoric (este constant), va fi: $K_t = \frac{U_{LC}}{U_2}$.

$U_{LC}$ — tensiunea nominală a liniei de contact ($U_{LC} = 25$ kV).

— Cu notațiile de mai sus, calculul treptelor de tensiune pe motor și a prizelor de tensiune la înfășurarea de reglare rezultă astfel:

| Nr. treaptă | 1 | 2 | 3 | 4 | $z-2$ | $z-1$ | Z |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $U_m(V)$ | $U_{m1}$ | $U_{m2}$ | $U_{m3}$ | $U_{m4}$ | $U_{m(z-2)}$ | $U_{m(z-1)}$ | $U_m$ |
| $U_2$ | $U_{2.1}$ | $U_{2.2}$ | $U_{2.3}$ | $U_{2.4}$ | $U_{2(z-2)}$ | $U_{2(z-1)}$ | $U_2$ |
| $U_1$ | — | $U_{1.2}$ | — | $U_{1.4}$ | $U_{1(z-2)}$ | — | $U_1$ |

Pentru coloana $Z$ (ultima treaptă) toate valorile sînt cunoscute:

$U_m$ — tensiunea nominală a motorului;

$U_2$ — tensiunea eficace în gol la secundarul transformatorului, se calculează din $U_m$ (se amplifică $U_m$ cu un coeficient $A$, determinat de căderile de tensiune ohmice și inductive între motor și transformator);

$U_1$ — tensiunea nominală a liniei de contact ($U_1 = U_{LC} = 25.000$ V); pentru control $U_1 = k_t \cdot U_2$.

Treapta $z-2$ (coloana respectivă) rezultă prin calcul astfel:

$$U_{m(z-2)} = U_m - \Delta U_m;$$

$$U_{2(z-2)} = U_{m(z-5)} \cdot A.$$

Treptele 2, 4 ... $z-2$, $z$ sînt treptele directe care determină și prizele de tensiune, ca număr și valoare, la înfășurarea primară de reglare a transformatorului, iar treptele 1, 3 ... ... $z-1$ sînt numai intermediare de tensiune pe motor și rezultă scăzînd rația de tensiune $\frac{\Delta U_m}{2}$ din treapta precedentă $\left( U_{m(z-1)} = U_m - \frac{\Delta U_m}{2};\ U_{m(z-3)} = U_{m(z-2)} - \frac{U_m}{2} \ldots \right)$

*Exemplu de calcul pentru LE—060—EA (CFR)*

Datele problemei:

— Motor de tracțiune LJE—108/1 cu $U_m = 770$ V;

— Tensiunea $U_2 = A \cdot U_m = 1{,}33 \times 770 = 967$ V;

— Tensiunea nominală la linia de contact $U_{LC} = 25\,000$ V;

— Raportul de transformare al transformatorului redresoric $K_t = \frac{25\,000}{967} = 25{,}85$;

— Trepte de tensiune pe motor $z = 40$; prize de tensiune la înfășurarea de reglare $z_1 = 20$;

— Rația de tensiune între două trepte de tensiune pe motor, treptele directe $U_m = \frac{770}{20} = 38{,}5$V;

— Trepte intermediare $\frac{\Delta U_m}{2} = 19{,}5$ V.

| Nr. treaptă | 1 | 2 | 38 | 39 | 40 |
|---|---|---|---|---|---|
| $U_m$(V) | 35.4 | 54 | 731,5 | 751 | 770 |
| $U_2$(V) | 47 | 72 | 919 | 1 000 | 967 |
| $U_1$(V) | — | 1 850 | 22100 | — | 25 000 |

5.12.3. **Stabilirea puterii de dimensionare a înfășurării transformatorului.** Dimensionarea transformatorului este influențată de modul de reglare al tensiunii (reglarea pe înaltă sau joasă tensiune) și de schema de montaj a redresorului (montaj punte sau montaj push-pull).

Prin definiție se numește *putere de dimensionare* a unei înfășurări de transformator de locomotivă, produsul tensiunii maxime în gol la înfășurare cu intensitatea ce o parcurge în regimul continuu al locomotivei. Este o valoare convențională obținută prin asocierea a două mărimi electrice care nu corespund simultan aceluiași regim funcțional, dar care dă imaginea dimensionării constructive (pierderile în fier depind de tensiune, iar cele în cupru de curent).

Considerăm cazul unei locomotive cu redresorul alcătuit din diode în montaj punte și reglarea pe înaltă tensiune (soluție generalizată), ca în schema din figura 5.55.

Notînd:

$U_2$ — tensiunea eficace la secundarul transformatorului, corespunzătoare situației cînd pe motor se aplică tensiunea lui nominală;

$I_2$ — curentul eficace în secundar, considerat pentru situația cînd motorul este parcurs de curentul nominal;

$U_m$, $I_m$ — tensiunea și curentul nominal pe motor.

În ipoteza unei comutații instantanee avem:

$$U_m = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 - (\Delta U_{red} + \Delta U_{ind}) =$$

$$= 0{,}9\, U_2 - (\Delta U_{red} + \Delta U_{ind}).$$

Căderile de tensiune în redresor ($\Delta U_{red}$) și inductive ($\Delta U_{ind}$) în motor și self de aplatisare reprezintă circa 17% din $U_2$, deci

$$U_m = 0{,}9\, U_2\, (1 - 0{,}17) = 0{,}75\, U_2,$$

de unde

$$U_2 = 1{,}33\, U_m.$$

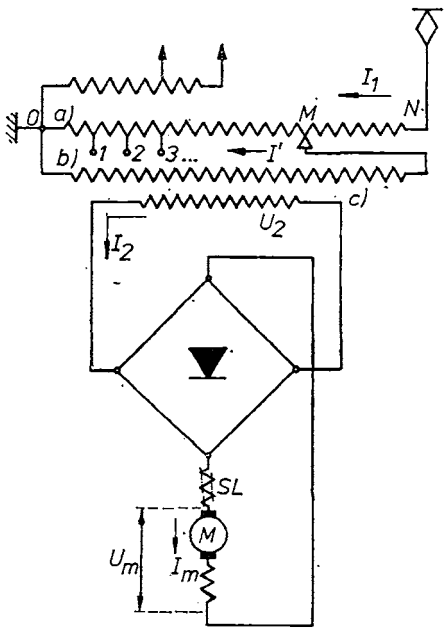



*Fig. 5.55.* Schema de calcul pentru determinarea puterii de dimensionare a înfășurărilor transformatorului.

Relația între curentul motorului și curentul eficace la secundarul transformatorului (vezi 7.2) este:

$$I_2 = \left(1 + \frac{\beta^2}{4}\right) I_m = 1{,}02\, I_m.$$

— ondulația curentului, cu valoarea uzuală $\beta = 0{,}3$.

Puterea de dimensionare a secundarului transformatorului (înf. *c*):

$$P_2 = U_2 I_2 = 1{,}33\, U_m \cdot 1{,}02\, I_m = 1{,}35\, U_m\, I_m.$$

În ipoteza că locomotiva are $m$ motoare, pentru întreaga înfășurare secundară,

$$P_{2.tot} = m\ 1{,}35\, U_m I_m.$$

Puterea de dimensionare a înfășurării primare a transformatorului de tracțiune (înf. *b*):

$$P_1 = P_2 = 1{,}35\, U_m\, I_m.$$

Puterea de dimensionare a înfășurării de reglare (autotransformator — înf. *a*):

$$\frac{U_{ON}}{U_{OM}} = \frac{W_a}{W_{OM}} = \frac{I'}{I_1}; \quad I_1 = I' \frac{W_{OM}}{W_a}.$$

Curentul care circulă între spirele $OM$ va fi:

$I_{OM} = I' - I_1 = I' \left( 1 - \frac{W_{OM}}{W_a} \right)$ și depinde de poziția punctului $M$ (poziția graduatorului).

În calcule se adoptă o valoare medie, $I_1 = 0{,}75\ I'$,

însă, $P_1 = U_{ON} I'$;

Așadar, $P_{AT} = U_{ON} I_1 = 0{,}75\ P_1 = 0{,}75 \cdot 1{,}35\ U_m I_m = 1{,}01\ U_m I_m$.

Notînd cu $P_t$ — puterea necesară încălzirii trenului și $P_{SA}$ — puterea pentru serviciile auxiliare, rezultă:

$$P_{AT} = 1{,}01\ U_m I_m \cdot m + P_t + P_{SA}.$$

Se face mențiunea că unii constructori, în funcție de destinația locomotivei, și profilul căii (în cazul profilelor accidentate), aleg puterea nominală de dimensionare a transformatorului de tracțiune și corespunzător a înfășurării de reglare circa 80% din aceea rezultată prin calcul ca mai sus. Aceasta este justificată pe posibilitatea de supraîncărcare a transformatorului; în mod uzual se admite o suprasarcină de 50% timp de 20 min. și 20% timp de una oră.

Dacă serviciul locomotivei este caracterizat prin suprasarcini temporare, așa cum este cazul pe linii cu profil accidentat, asemenea mod de alegere a puterii transformatorului este satisfăcător, întrucît la regimul uniorar transformatorul și motoarele de tracțiune se găsesc la egalitate de putere (motoarele de tracțiune admit aceeași suprasarcină).

În cazul locomotivelor destinate remorcării trenurilor rapide și de lung parcurs cînd se utilizează mai multe ore puterea de regim continuu a locomotivei este necesar ca și transformatorul să fie dimensionat la puterea de calcul a regimului continuu nemailuînd în considerare regimul de suprasarcină.

*Exemplu de calcul* pentru LE—060—EA (CFR):

$U_m = 700$ V; $I_m = 1180$ A; $m = 6$

$P_2 = 1{,}35 \times 770 \times 1180 \cdot 6 = 7350$ kVA

$P_1 = P_2 = 7350$ kVA

$P_{AT} = 1{,}01 \times 770 \times 1180 \times 6 = 5500$ kVA

$P_{AT} = 5500 + 700 + 160 = 6360$ kVA

$P_t = 15$ vag. $\times$ 40 kVA/vag. $= 700$ kVA; $P_{SA} = 160$ kVA.

Alte caracteristici ale transformatorului locomotivei 060—EA:
— tipul transformatorului TFVL 580
— dimensiuni gabaritice: $L = 1780$; $l = 1565$; $h = 2225$ mm

| | |
|---|---|
| — greutăți: miezurile și înfășurările | 7450 |
| cuva și izolatoarele | 1950 |
| uleiul | 3700 |
| | 13100 |
| contactoarele de sarcină | 500 |
| | 13600 kg. |

## 5.13. SERVICII AUXILIARE

Acestea sînt alcătuite din instalații și agregate care nu participă nici la realizarea forței de tracțiune nici la reglarea vitezei, însă fără ele nu este posibilă funcționarea locomotivei.

În cazul locomotivelor cu redresoare schema-bloc generalizată pentru realizarea serviciilor auxiliare este redată în figura 5.56.

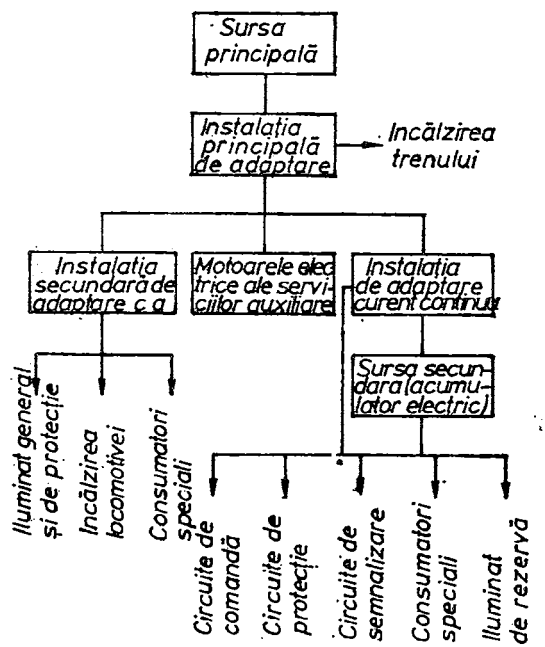



*Fig. 5.56.* Schema generală pentru realizarea serviciilor auxiliare și a circuitelor de comandă și protecție.

Din examinarea schemei-bloc se constată că serviciile auxiliare pot fi împărțite în trei părți distincte:

— sursa de alimentare cu instalația de adaptare a formei de energie;

— circuitele de alimentare a motoarelor de antrenare a agregatelor serviciilor auxiliare;

— alimentarea circuitelor de comandă, protecție și semnalizare.

Sursa principală de alimentare a serviciilor auxiliare o formează evident tot linia de contact și apoi instalația principală de adaptare.

Printre mașinile electrice care antrenează agregatele serviciilor auxiliare, cele mai importante sînt:

— motoarele grupurilor compresoare;
— motoarele pentru ventilarea forțată a motoarelor de tracțiune;
— idem, pentru rezistențele de frînare;
— idem, pentru redresoare;
— motorul pentru ventilarea instalației de răcire a transformatoarelor;
— motorul pentru pompa de ulei a transformatorului.

Pentru alimentarea motoarelor electrice care antrenează agregatele serviciilor auxiliare sînt posibile mai multe soluții:

— folosirea motoarelor monofazate directe la 50 Hz;
— utilizarea motoarelor asincrone trifazate normale la 50 Hz;
— utilizarea motoarelor de curent ondulat.

5.13.1. **Servicii auxiliare cu motoare monofazate directe la 50 Hz.** Alimentarea se face de la înfășurarea secundară a transformatorului principal, dimensionată în consecință, și la o tensiune joasă, convenabilă. Dificultățile acestei soluții constau în randamentul slab al motorului datorită șunturilor ohmice ale polilor auxiliari și demarării motorului, care necesită o fază ajutătoare ce se creează prin rezistență, ca în schema de principiu din figura 5.57.

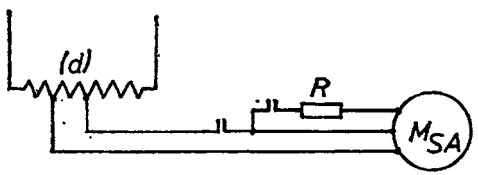



*Fig. 5.57.* Servicii auxiliare cu motor monofazat 50 Hz: *d* — înfășuarea trafo pentru servicii auxiliare; *R* — rezistență de demaraj; $M_{SA}$ — motorul serviciului auxiliar.

După demararea motorului, rezistența *R* trebuie eliminată din circuit, ceea ce se face cu un releu cronometric, a cărui funcționare adesea este incertă. De asemenea, trebuie menționat că un motor monofazat este mult mai greu decît un motor trifazat de aceeași putere.

Această soluție a fost încercată pe unele exemplare de locomotive electrice fără rezultate satisfăcătoare și nu se mai aplică.

5.13.2. **Serviciile auxiliare cu convertizor ARNO.** Utilizarea motorului asincron trifazat normal la 50 Hz ca motor de antrenare a serviciilor auxiliare oferă marele avantaj al simplității și robusteții motorului.

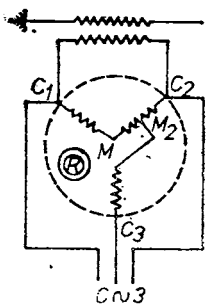



*Fig. 5.58.* Principiul convertizorului Arno.

Pentru alimentarea motoarelor trifazate este necesar a instala pe locomotivă un grup convertizor mono-trifazat. O soluție larg aplicată pe locomotivele monofazate 50 Hz este convertizorul *ARNO*.

În principiu, convertizorul *ARNO-Ferraris* (după numele celor care l-au construit și aplicat) este un motor asincron cu rotorul în scurtcircuit (colivie), avînd înfășurarea statorică special modificată, astfel că primește alimentarea monofazată 50 Hz de la transformator și debitează curent alternativ trifazat 50 Hz.

Schema de principiu este reprezentată în figura 5.58.

Statorul are două înfășurări legate între ele: una denumită înfășurare-motor ($C_1$—$M$—$C_2$) și alta denumită în-

fășurare-generator ($M_2$—$C_3$). nfășurarea-motor este alimentată de la transformator la bornele $C_1$—$C_2$; înfășurarea-generator se leagă cu unul din capete la înfășurarea-motor în punctul $M_2$, separînd-o în două faze de spire diferite, calculate astfel ca să se obțină o cît mai bună simetrie de tensiune pe partea trifazată.

Capătul liber $C_3$ al înfășurării-generator și cele două capete ale înfășurării-motor alcătuiesc sursa trifazată (adică bornele $C_1$—$C_2$—$C_3$).

*a) Demarajul convertizorului.* Curentul monofazat de alimentare creează în înfășurarea statorului un cîmp magnetic pulsator și nu rotitor, deci convertizorul nu se poate porni. Pentru lansare se alcătuiește o schemă cu fază ajutătoare, specială, incluzînd o rezistență în faza generatorului, ca în figura 5.59.

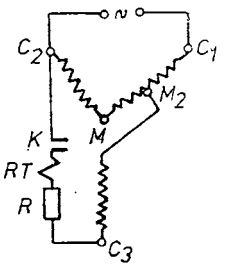


*Fig. 5.59.* Lansarea convertizorului Arno.

Faza ajutătoare cu rezistență asigură un decalaj al fazelor curenților ce circulă prin înfășurări, obținîndu-se un cîmp rotitor. La atingerea turației nominale, releul de turație $RT$ acționează și scoate faza ajutătoare din circuit prin declanșarea contactorului $K$.

La o turație minimă prescrisă, releul de turație reanclanșează faza ajutătoare.

*b) Funcționarea în sarcină a convertizorului.* Pentru funcționarea normală a convertizorului se recomandă ca la bornele $C_2$—$C_3$ să se monteze o baterie de condensatoare care îmbunătățește caracteristicile de demaraj ale motoarelor serviciilor auxiliare, permite să se obțină dimensiuni de gabarit mai mici ale convertizorului, îmbunătățește cos $\varphi$ al sistemului, îngăduie posibilitatea reglării tensiunii cînd variază sarcina pe partea trifazată, reduce curenții și căderea de tensiune în fazele convertizorului.

Bateria de condensatoare este repartizată pe fiecare motor al serviciilor auxiliare, așa că fiecare motor, cînd intră în funcțiune pe barele trifazate ale convertizorului, intră cu capacitatea sa aferentă.

Dacă s-ar monta bateria de condensatoare cu întreaga ei valoare pe faza convertizorului, pentru situația cînd serviciile auxiliare ar funcționa parțial, s-ar mări tensiunea pe partea trifazată.

Este necesară menținerea tensiunii între anumite limite acceptabile pe partea trifazată a convertizorului, lucru ce se realizează prin montarea bateriei de condensatoare, întrucît motoarele serviciilor auxiliare sînt mașini de inducție. Or, este știut că, pentru menținerea puterii, la variația tensiunii variază curentul absorbit. Acest lucru nu deranjează prea mult, însă ceea ce supără este cuplul mașinii care este proporțional cu pătratul tensiunii.

*c) Schema de conexiune a serviciilor auxiliare.* Schema de conexiune a convertizorului *ARNO* la transformatorul de alimentare și a electromotoarelor asincrone la barele trifazate ale convertizorului este prezentată în figura 5.60.

În schemă s-a figurat, ca exemplu, conexiunea unui singur agregat, electroventilatorul $V$; restul agregatelor auxiliare se conectează în mod identic.

Pe axul convertizorului se montează și un generator de curent continuu cu excitație-derivație $g$ pentru încărcarea bateriei de acumulatoare.

Pe schemă s-a figurat și conectarea grupului compresor auxiliar $C_a$ pentru punerea în serviciu a automatului principal al locomotivei și a pantografelor. Acest compresor auxiliar este acționat de un electromotor de curent continuu alimentat de la bateria de acumulatoare.

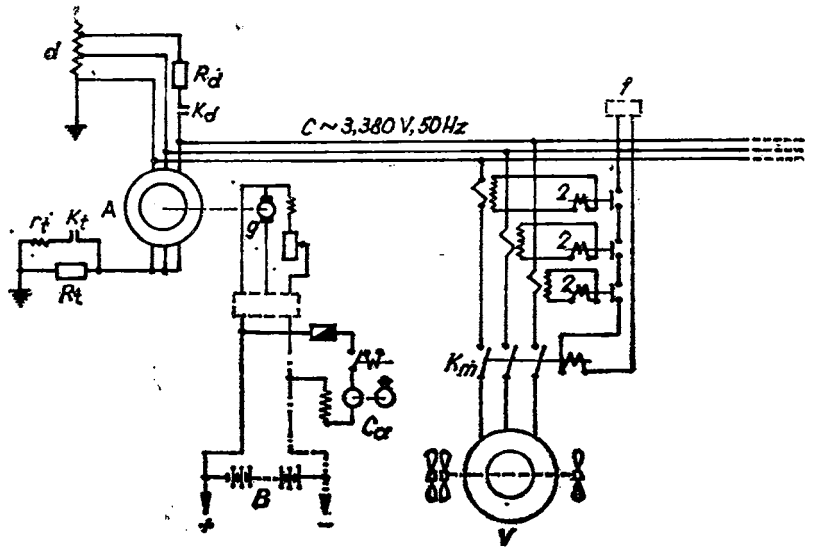



*Fig. 5.60.* Schema de conexiuni a motoarelor serviciilor auxiliare. $K_d$, $R_d$ — contactor și rezistență de demaraj; $A$ — convertizorul Arno; $K_t$, $R_t$, $r_t$ — contactor, rezistență, releu pentru legarea la masă a convertizorului; *1* — circuit de comandă a contactorului motorului $K_m$; *2* — relee penrtu protecția maximală de curent.

*Grup convertizor mono-trifazat.* Grupul convertizor *ARNO* prezintă inconvenientul că la fluctuațiile de tensiune din linia de contact care sînt mari (27 la 19 kV), acestea se repercutează, evident, și la bornele motoarelor serviciilor auxiliare al căror cuplu fiind proporțional cu $U^2$ cere o supradimensionare și a motorului și a grupului convertizor. O ameliorare a acestui incon-

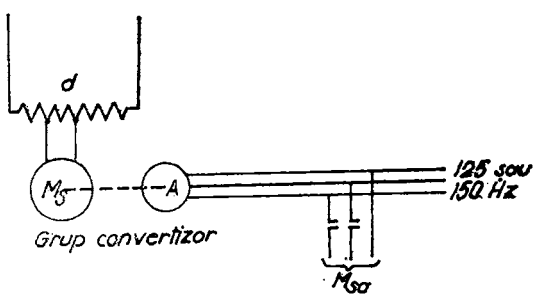



*Fig. 5.61.* Grup convertizor rotativ mono-trifazat pentru alimentarea serviciilor auxiliare: $M_s$ — motor monofazat sincron; $A$ — alternator trifazat.

venient se poate aduce folosind un grup convertizor compus din motor monofazat sincron cuplat cu un alternator de frecvență ridicată, ca în schema de principiu din figura 5.61.

Frecvența ridicată conduce la motoare ușoare și astfel se compensează greutatea grupului convertizor.

Cu tot avantajul menționat, această variantă cu grup convertizor mono-trifazat nu s-a răspîndit ca soluție consacrată în locul grupului *ARNO*, acesta din urmă avînd marele avantaj de a fi realizat într-o singură mașină.

De menționat că există aplicată și soluția cu grup convertizor mono-trifazat la frecvența 50 Hz, cazul locomotivelor Rbl-ASEA.

5.13.3. **Convertirea statică mono-trifazată** (obținerea fazei a treia prin baterie de condensatoare). Principiul realizării sistemului trifazat de pe o înfășurare monofazată, este redat schematic în figura 5.62. Scoțînd trei prize de tensiune în punctele $O_1$, $A$, $B$ (figura 5.62, *a*), vectorii tensiunilor respective $\overline{U}_{O_1A}$, $\overline{U}_{AB}$, $\overline{U}_{O_1B}$ sînt în fază (fig. 10.3, *b*). Un sistem trifazat se poate obține intercalînd în punctul $B$ un condensator $C$, iar tensiunea la bornele sale (vectorul $U_{BE}$) va asigura un decalaj cu un unghi oarecare față de vectorul $U_{O_1B}$; în acest caz între punctele electrice $O_1$, $A$, $E$ se formează un sistem trifazat asimetric (fig. 5.62, *c*). În scopul simetrizării sistemului (reprezentarea sugestivă din fig. 5.62, *d*) problema se reduce la aflarea poziției punctului $B$ pe vectorul $O_1M$ de unde trebuie scoasă priza de tensiune pentru conectarea condensatorului. În practică se folosesc metode grafo-analitice pentru determinarea punctului $B$, ținînd seama că valoarea capacității condensatorului este determinată de relația:

$$C = \frac{I_c \cdot 10^6}{2\pi f \cdot U_{BC}} \ (\mu\text{F}),$$

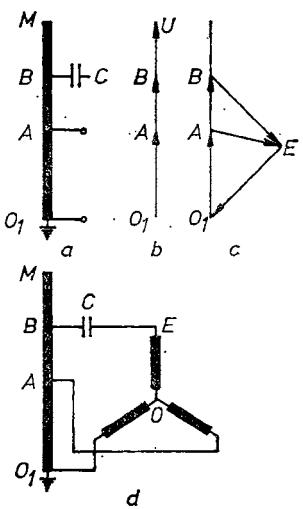



*Fig. 5.62.* Principiul de realizare a unui sistem trifazat pe o înfășurare monofazată.

$I_c$ fiind valoarea curentului prin faza cu condensator (mărime cunoscută). Se precizează că sistemul rămîne simetric numai pentru sarcina și tensiunea pentru care a fost determinată capacitatea $C$ a condensatorului; orice variație a tensiunii liniei de contact conduce la un sistem asimetric care se repercutează nefavorabil asupra funcționării motoarelor serviciilor auxiliare.

Alimentarea serviciilor auxiliare la locomotivele 060-EA și 040-EC (CFR) este realizată în această variantă; pentru tipul 060-EA, cu menținerea notațiilor originale ale fabricantului și din instrucția de serviciu, schema circuitului serviciilor auxiliare este prezentată în figura 5.63.

Alimentarea în trifazat a motoarelor serviciilor auxiliare se face folosind una din prizele de tensiune:

$O_1$—386—662 V, pentru cazul cînd tensiunea la linia de contact ($U_{LC}$) este mai mare ca 22 kV;

$O_1$—460—662 V, pentru cazul $U_{LC} < 22$ kV.

Trecerea de pe o alimentare pe alta se face fără întreruperea circuitului, cu ajutorul comutatoarelor ($S_{8\cdot4} \cdots S_{8\cdot5}$) și rezistențelor de trecere 32—33 puse sub dependența unui releu de tensiune.

În acest mod se ameliorează nivelul de tensiune la bornele motoarelor serviciilor auxiliare, știut fiind că tensiunea în linia de contact poate avea

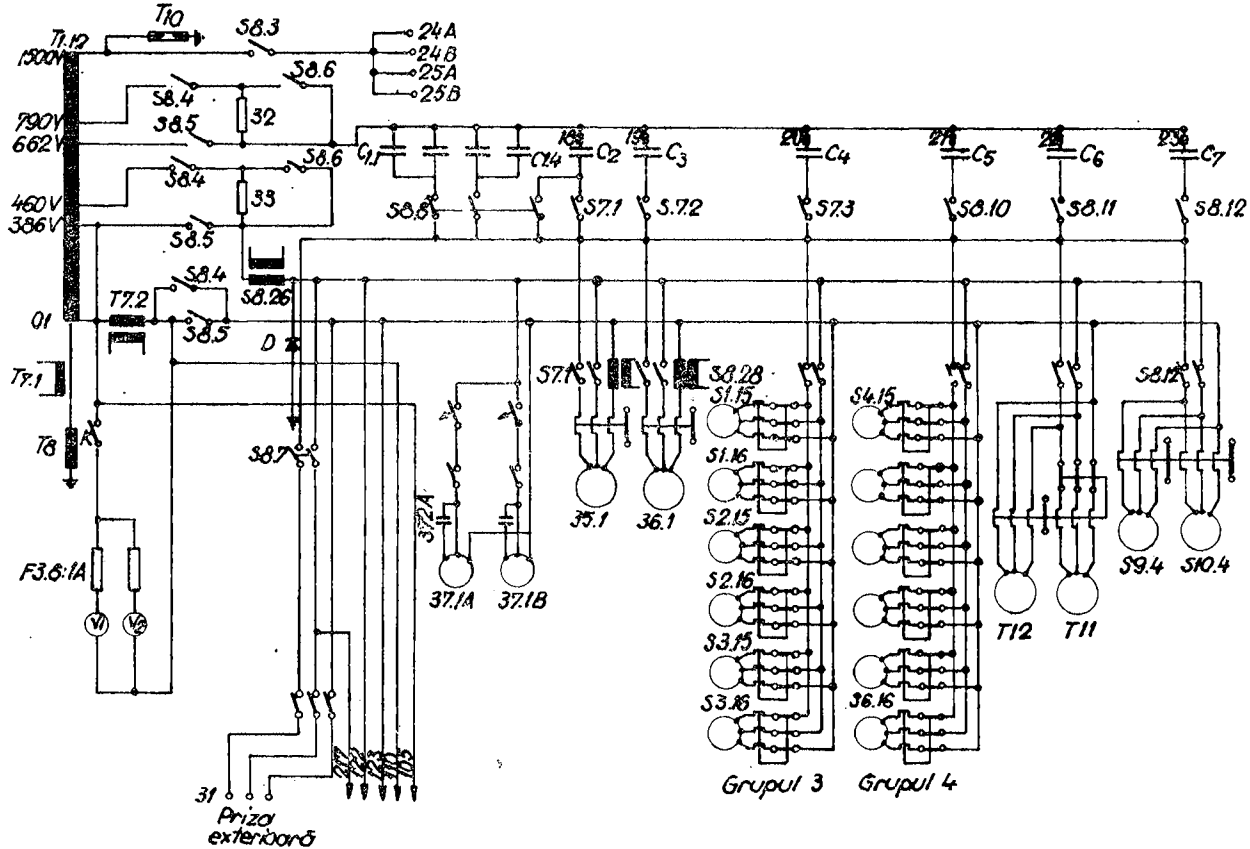



*Fig. 5.63.* Schema circuitelor serviciilor auxiliare la LE-060-EA (CFR).

fluctuații 19—27,5 kV, iar cuplul motorului asincron depinde de pătratul tensiunii.

Decalarea fazei a treia (obținerea sistemului trifazat) se face în punctul $B$ de tensiune 662 V (respectiv 790 V) intercalînd în această fază, odată cu branșarea motorului trifazat respectiv, condensatoarele $C_2$, $C_3 \ldots C_7$ care rămîn în permanență în circuit atîta vreme cît motorul respectiv este conectat la sistemul trifazat $O_1—A—B$.

La pornire un motor asincron absoarbe un curent de 5—7 ori mai mare decît cel nominal ceea ce înseamnă că ar trebui dimensionată capacitatea de defazare ($C_2$, $C_3 \ldots C_7$) la această valoare a curentului, iar după terminarea procesului de pornire capacitatea ar rămîne exagerat de supradimensionată și nefolosită. Pentru ameliorarea acestei situații, s-a prevăzut o baterie de condensatoare de pornire ($C_{1.1} \ldots C_{1.4}$) dimensionată pentru pornirea unui grup de motoare ale serviciilor auxiliare, acestea fiind aranjate pe specific funcțional în șase grupe care totalizează puteri cît mai apropiate (fig. 5.63):

— grupa 1, motorul compresorului *1* (35.1)

— grupa 2, motorul compresorului *2* (36.1)

— grupa 3, motoarele ventilatoarelor pentru motoare de tracțiune și redresoare ($S_{1.15} \ldots S_{3.16}$)

— grupa 4, idem ($S_{4.15} \ldots S_{6.16}$)

— grupa 5, motoarele pentru ventilator și pompă ulei a transformatorului ($T_{12}—T_{11}$)

— grupa 6, motoarele ventilatoarelor rezistențelor de frînare.

Bateria de condensatoare de pornire este folosită numai pentru pornirea unei singure grupe de mașini, iar după terminarea acesteia ea este folosită la pornirea grupei următoare; adică, nu pot fi pornite simultan două sau mai multe grupe în care scop se prevăd înzăvorîri care nu permit începerea pornirii unei alte grupe decît atunci cînd este terminată pornirea grupei precedente. Odată grupa respectivă pornită ea rămîne în circuit numai cu capacitatea sa proprie dimensionată la curentul nominal.

Exemplu pentru pornirea motorului compresorului (poz. 35.1 — fig. 5.63):

— prin butonul de comandă aflat pe pupitru, se dă comandă de închidere contactorului de pornire $S_{8.8}$, care bagă în circuit bateria de condensatoare de pornire ($C_{1.1} \ldots C_{1.4}$) și în același timp și capacitatea proprie $C_2$ dimensionată pentru curentul nominal al motorului 35.1;

— după atingerea turației nominale a grupului 35.1, relee temporizate comandă deconectarea contactorului $S_{8.8}$ care scoate din circuit capacitatea de pornire (temporizarea este de ordinul a cîteva secunde);

— capacitatea proprie $C_2$ rămîne în circuit prin închiderea contactorului $S_{7.1}$.

În mod similar se pornesc și celelalte grupe de mașini.

Grupa 6 (motoarele ventilatoarelor rezistențelor de frînare) pornește în momentul cînd mecanicul trece controlerul pe poziția „frînă electrică" (se comandă contactorul tripolar $S_{8.12}$); după întreruperea regimului de frînare electrică, ventilatoarele continuă să funcționeze încă circa două minute, sub controlul unui releu de timp, după care se dă comandă de deschidere contactorului $S_{8.12}$.

Circuitul de încălzire electrică a trenului este realizat la 1500 V—50 Hz — curent monofazat (conform normelor *UIC*) și este realizat de la transforma-

torul de încălzire (înfășurarea $T_{1\cdot12}$ cuplată electromagnetic cu înfășurarea primară de reglare) prin:

— contactorul de încălzire ($S_{8\cdot3}$);

— prizele de curent de la capetele locomotivei (24—25);

— descărcătorul $T_{10}$ care asigură protecția circuitului de încălzire la supratensiuni și descărcări atmosferice;

— transformatorul de curent $T_{7\cdot1}$ care alimentează un releu maximal de curent și asigură protecția circuitului de încălzire la suprasarcini și scurtcircuite.

Alte elemente cuprinse în schema circuitelor serviciilor auxiliare (fig. 5.63):

— protecția motoarelor serviciilor auxiliare se asigură, de regulă, cu relee termice ($S_{8\cdot28}$);

— măsura tensiunii din linia de contact se face indirect prin voltmetrele $V_1$, $V_2$ (cîte unul pentru fiecare cabină) conectate prin rezistențele $F_{3\cdot8:1A}$ între fazele $O_1$—386 V;

— 37.1 *A*, 37.1 *B* sînt motoare monofazate 50 Hz, 380 V, 120 W pentru antrenarea ventilatoarelor din cabine; demararea lor se face cu fază ajutătoare prin condensator 37.2*A*;

— 31 priză trifazată 3 × 380 V exterioară, pentru alimentarea serviciilor auxiliare de la o sursă externă 3 × 380 V—50 Hz, în scopul probării lor, cînd locomotiva se află în depou scoasă de sub linia de contact;

— conductorii 105, 110 ... 217 servesc la alimentarea în curent monofazat 380 V—50 Hz a circuitelor serviciilor proprii și circuitelor de comandă (vezi fig. 5.64).

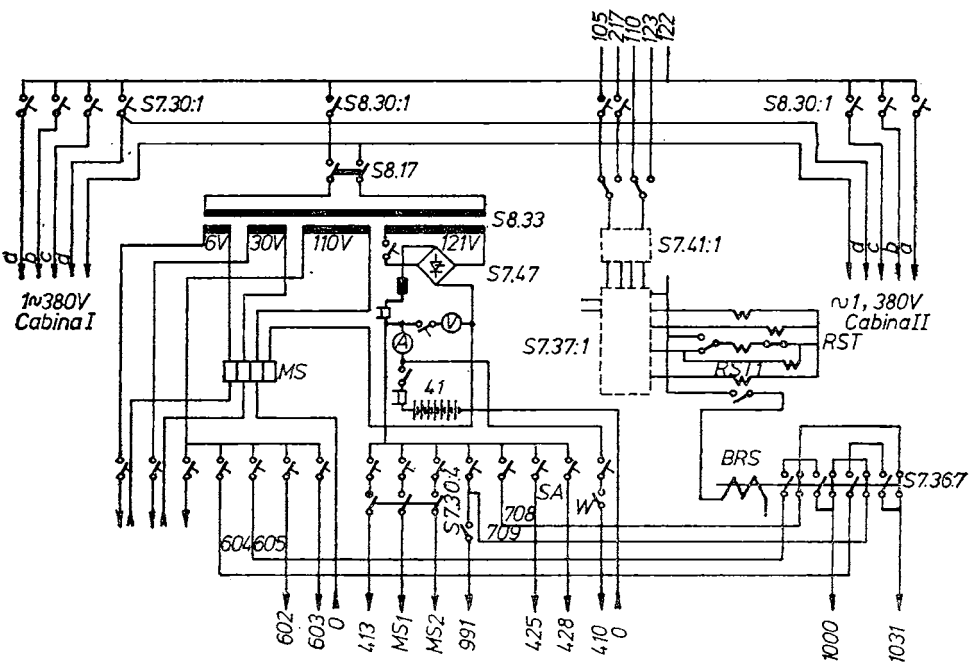



*Fig. 5.64.* Schema circuitelor serviciilor proprii și circuitelor de comandă la LE—060—EA(CFR).

*Circuitele proprii și circuitele de comandă* (fig. 5.64). O parte din circuitele proprii ale locomotivei sînt alimentate în curent monofazat 50 Hz—380 V, altele tot în curent monofazat 50 Hz însă tensiuni mai joase conform destinației lor, iar circuitele de comandă în curent continuu 110 V. Semnificația notațiilor și destinația circuitelor mai importante (fig. 5.64) este următoarea:

— 105... 122 conductorii pentru alimentarea în monofazat 50 Hz—380 V;

— $S_{7.30:1}$, $S_{8.30:1}$ siguranțe automate pentru protecția circuitelor;

— *a*, radiator încălzire (2—4—6 kW); *b*) motorul ventilatorului radiatorului de încălzire;

— *c*, plită electrică (130—300—1200 W);

— *d*, rezistența pentru încălzirea parbrizului (2 × 300 W); circuitele *a*, *b*, *c* ... se regăsesc în cele două cabine de conducere: cabina *I*, cabina *II*;

— $S_{8.33}$, transformator monofazat cu patru prize de tensiune la secundar avînd destinația: 6 V, pentru iluminatul aparatelor de măsură de pe pupitrele de comandă; 30 V, pentru farurile centrale ale locomotivei; 110 V, pentru alimentarea traductorului de curent de frînare, generatorul de impulsuri al graduatorului și frigider; 120 V, pentru alimentarea punții de redresare tiristorizată $S_{7.47}$ care servește la încărcarea bateriei de acumulatoare 41 (*A* — ampermetru, *V* — voltmetru pentru controlul circuitului de încărcare a bateriei de acumulatoare);

— la 110 V curent continuu sînt alimentate circuitele:

— 413, pentru înfășurarea de premagnetizare a transformatoarelor de impuls care comandă scurtcircuitoarele de protecție a redresoarelor (fig. 5.28)

- $MS_1$, $MS_2$, circuite de comandă
- 991, iluminat (de rezervă)
- 425, radiotelefon
- 428, instalația de vitezometre
- 410, motocompresor auxiliar (ridicarea pantografului și conectarea automatului principal, cînd s-a pierdut aerul comprimat și pantograful este coborît).

Releul $S_{7.36:7}$ asigură comutarea automată a instalației de iluminat (circuitul 1000) și de semnalizare (1031) pe 100 V curent continuu, atunci cînd dispare sursa de curent alternativ (pantograf coborît).

Comutarea iluminatului de rezervă a aparatelor de măsură pe curent continuu se face manual prin comutatorul $S_{7.30:4}$ a circuitului 991.

— Tot de la sursa 380 V monofazat, prin instalația de adaptare $S_{7.41:1}$ se alimentează blocul de amplificare $S_{7.37:1}$ al releelor $S_{7.37:7}$ care palpează variația tensiunii liniei de contact și în funcție de valoarea ei ($U_{LC} > 22$ kV sau $U_{LC} <$ $< 22$ kV) dă comenzi pentru comutarea prizelor de tensiune pentru serviciile auxiliare blocarea graduatorului în sensul creșterii tensiunii ...

În tabelul 5.3 sînt dați parametrii motoarelor serviciilor auxiliare de la locomotiva electrică 060(-EA (CFR)

5.13.4. **Asupra fiabilității motoarelor serviciilor auxiliare.** La realizarea convertirii mono-trifazate cu condensatoare, sistemul trifazat simetric se obține la o anume valoare a tensiunii din linia de contact și pentru încărcarea nominală a motoarelor. La o mare variație a tensiunii în linia de contact (17,5 ···27,5 kV), cu toată comutarea la cele două trepte ($U_{LC} \gtrless 22$ kV), sistemul trifazat devine asimetric cu mari variații ale tensiunilor între faze, apar supratensiuni cînd lucrează aparatajul de comutare, datorită armonicilor

*Tabelul 5.3*

**Parametrii motoarelor de antrenare a agregatelor serviciilor auxiliare de la locomotiva 060-EA (CFR)**

| Denumirea agregatului | Parametrii motorului de antrenare |
|---|---|
| Compresor | 22 kW—3×380 V, 50 Hz—42 A—1455 rot/min |
| Compresor auxiliar | 0,75 kW—110 V c.c.—8A—1400 rot/min |
| Pompa de ulei trafo | 2,1 kW—3×380 V, 50 Hz—4 A—1400 rot/min |
| Ventilator răcitor trafo | 11 kW—3×380 V, 50 Hz—23 A—1460 rot/min |
| Ventilator pentru grupul motor tracțiune-redresor | 3,7 kW—3×380 V, 50 Hz—7,2 A—2890 rot/min |
| Ventilator rezistențe frînare | 11 kW—3×380 V, 50 Hz—23 A—1460 rot/min |
| Agregat încălzire cabină | 0,12 kW—380 V, 50 Hz. |
| Servomotor graduator | 0,185 kW—110 V c.c. —3 A |

generate la redresare apare un regim deformant (forma tensiunii și curentului sînt departe de sinusoide) ..., toate acestea conduc în exploatare la un regim greu de funcționare a motoarelor asincrone ale serviciilor auxiliare (cuplul depinde de pătratul tensiunii, tensiunile și curenții asimetrici provoacă încălziri mari ale bobinajelor; s-au constatat prin măsurători variații de 50% ale curenților în faze și ± 20% variații ale tensiunilor).

În scopul sporirii fiabilității motoarelor asincrone ale serviciilor auxiliare, în principal se iau următoarele măsuri:

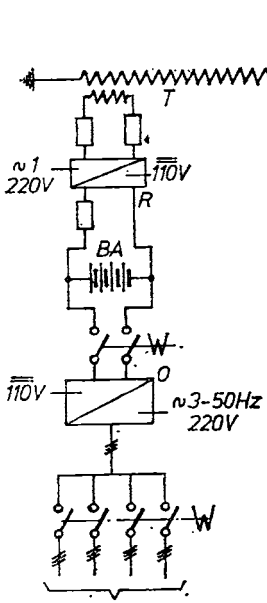



*Fig. 5.65.* Schema-bloc pentru un convertizor static monotrifazat stabilizator de tensiune (cu treaptă intermediară de curent continuu).

— Modificarea parametrilor inductivi ai circuitului de alimentare ai motoarelor prin introducerea unui reactor (bobină de self) care împreună cu capacitatea acționează ca un filtru pentru armonicile superioare (armonica 3), deci se reduce influența regimului deformant (poz. 18, 19 ... fig. 5.63);

— Protejarea la supratensiuni de comutație, prin montarea unui descărcător pe una din faze, de exemplu pe 386/460 V (poz. *D*—fig. 5.63);

— Supradimensionarea motoarelor asincrone, adică folosirea de motoare de construcție specială, pentru a lucra bine la disimetrii de curent și tensiune;

— Folosirea unui convertizor mono-trifazat stabilizator de tensiune (soluție mai nouă) realizat cu elemente semiconductoare; schema-bloc a unui atare convertizor este redată în figura 5.65; soluția este aplicată pe rama electrică seria *ET*—420 a căilor ferate din R.F.G.

5.13.5. **Servicii auxiliare cu motoare de curent ondulat.** Pe locomotive monofazate 25 kV, 50 Hz cu redresoare statice se pot folosi motoare de curent ondulat și pentru serviciile auxiliare. În acest mod se dispune de un singur tip de motor și pentru tracțiune și pentru serviciile auxiliare și de asemenea de un singur fel de curent.

Pentru alimentarea serviciilor auxiliare se folosește o punte de redresare proprie și dimensionată în consecință.

Pentru exemplificare în figura 5.66 s-a reprezentat schema electrică a

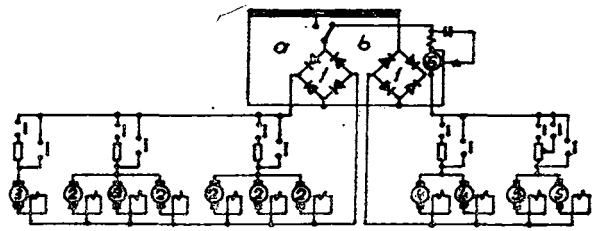



*Fig. 5.66.* Servicii auxiliare cu motoare de curent ondulat.

serviciilor auxiliare folosită pe locomotiva *K* (în exploatare la Căile ferate sovietice).

Pentru redresarea curentului sînt prevăzute două punți de redresare, ambele cu o putere de 260 kW. Una dintre punți ($PR_1$) poate fi conectată la priza „*a*" și livrează o tensiune redresată 180 V pentru motoarele ventilatoarelor motoarelor de tracțiune ($M_{1,2\ldots6}$) pe timp de iarnă, sau la priza „*b*" cînd tensiunea redresată este de 220 V, poziție pentru regim de vară. Puntea $PR_2$ este conectată permanent pentru 220 V și alimentează restul motoarelor serviciilor auxiliare (pompă ulei, ventilator, radiator ...).

Motoarele de curent ondulat pentru antrenarea serviciilor auxiliare se construiesc pentru o tensiune redusă la borne de 150...220 V, în scopul obținerii unei bune comutații și al evitării unei bobinări complicate a indusului.

Turația se alege cea mai potrivită pentru agregatul de antrenat, preferîndu-se antrenarea axială în vederea obținerii unui bun randament.

Fiind în general de puteri mici, motorul se realizează fără șuntarea ohmică a polilor principali, în care caz selful propriu al motorului este suficient pentru a realiza un coeficient de ondulație de 60...70 %. Datorită acestui fapt nu mai este imperios necesar a se monta self de aplatisare.

De asemenea, se poate menține clasa de izolație *B*.

Construcțiile actuale, în condițiile de mai sus, conduc la o greutate de circa 230 kg pentru un motor de 30 CP la 2000 rot/min.

## 5.14. FRÎNAREA ELECTRICĂ REOSTATICĂ LA LOCOMOTIVELE MONOFAZATE CU REDRESOARE

Teoria generală și principiile sînt aceleași ca la locomotiva de curent continuu cu următoarele precizări:

— De la motorul serie în regim de tracțiune, se trece la generator cu excitație separată în regim de frînă electrică (nu se folosește generatorul cu excitație serie).

— Indusul fiecărui generator debitează pe o rezistență de frînare de valoare fixă (nu se obișnuiește să se lege mai multe generatoare în serie sau paralel).

— Excitațiile separate ale generatoarelor se înseriază între ele, iar alimentarea lor putîndu-se face printr-una din soluțiile:

- punte redresoare separată pentru alimentarea excitațiilor separate ale generatoarelor;
- folosirea unei punți redresoare existentă a unui motor de tracțiune;
- punte de redresare tiristorizată prin care se poate regla curentul de excitație (reglare prin unghiul de deblocare a tiristoarelor).

— Reglarea frînării se face prin variația curentului de excitație.

În figura 5.67 s-a prezentat schema de principiu pentru realizarea frînei reostatice, în ipoteza folosirii unui transformator ($TE$) și o punte de redresoare ($PRE$) speciale pentru alimentarea înfășurărilor separate de excitație ($Ex_1$, $Ex_2$...).

Reglarea frînării se face prin variația curentului de excitație ($I_e$) obținută prin graduator ($GR$) în același mod ca în regim de tracțiune (reglaj prin amplitudine).

Frîna reostatică la LE-060-EA (CFR) este realizată pe principiul de mai sus, iar schema de principiu este redată în figura 5.68; pe schemă s-au menținut notațiile din documentația originală a locomotivei.

Pentru alimentarea înfășurărilor de excitație separate ($EF$) ale generatoarelor ($M_1$, $M_2$ ... $M_6$) se folosește grupul transformator ($T_{1.10}$) — redresor ($S_{4.12}$) al motorului *4* din regim de tracțiune; transformatorul de frînare ($T_{1.10}$) este cuplat magnetic pe secundarul transformatorului de tracțiune al motorului *4* care este primar în această situație.

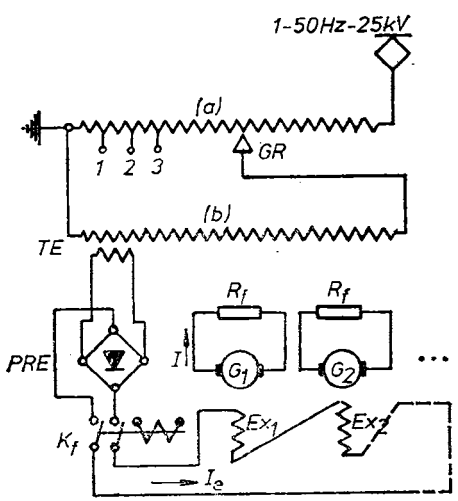



*Fig. 5.67.* Schema electrică de principiu a circuitului de frînare electrică reostatică, la locomotivele de curent monofazate 50 Hz.

Evident, în regim de frînă redresorul va lucra la o tensiune mult mai joasă decît în regim de tracțiune (la locomotiva în chestiune transformatorul de frînare debitează $I_{2max} = 1500$ A la tensiunea 110 V situație cînd graduatorul se află pe poziția 40 ultima). În regim de frînă contactorul $S_{4.1}$ al redresorului este deschis și intră în acțiune contactorul $S_{8.1}$ de alimentare a redresorului.

Fiecare indus al generatoarelor debitează separat pe o rezistență de frînare de valoare fixă ($S_{9.1}$, $S_{9.2}$... $S_{9.6}$).

Toate excitațiile separate sînt înseriate și deci sînt parcurse de același curent de excitație $I_e$ și ca urmare toate generatoarele vor avea aceeași tensiune la borne (viteza locomotivei fiind aceeași la toate osiile) și deci toate mașinile se vor încărca în mod uniform.

Reglarea frînării se face prin variația curentului de excitație ($I_e$) care se obține prin graduator.

În circuitul de frînare a uneia din mașini ($M_2$) este conectat un traductor de curent ($S_{9.7}$) pentru măsura curentului de frînare ($I$) la care este conectat un releu maximal de curent pentru protecția reostatului de frînare (dă semnal

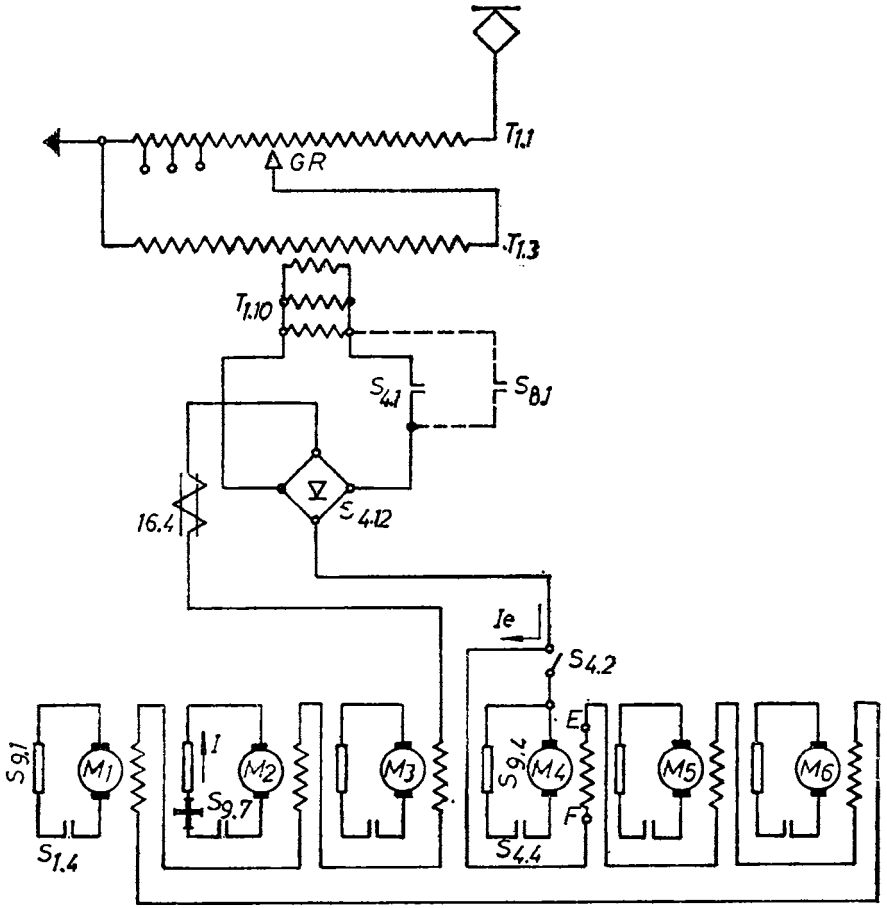



*Fig. 5.68.* Schema circuitului de frînare electrică reostatică la LE — 060—EA(CFR).

de blocare a graduatorului cînd valoarea lui $I$ a fost depășită; $I_{max}$ este reglat la 1030 A).

*Caracteristica de frînare* $F_f(V)$. În regim stabilizat de funcționare a generatorului cu excitație separată debitînd pe o rezistență de frînare, pot fi scrise următoarele ecuații (fig. 5.69)

$$E = K_e \Phi V = (r + R_f) I$$

de unde,

$$I = \frac{K_e \Phi V}{r + R_f}, \text{ sau } \Phi = \frac{(r + R_f) I}{K_e V}.$$

Cuplul de frînare, $C_f = K\,\Phi\,I$ devine:

$$C_f = \frac{K \cdot K_e}{r + R_f}\,\Phi^2\,V \text{ (înlocuind pe } I\text{)}; \qquad (1)$$

$$C_f = \frac{K}{K_e}(r + R_f)\,\frac{I^2}{V} \text{ (înlocuind pe } \Phi\text{)}. \qquad (2)$$

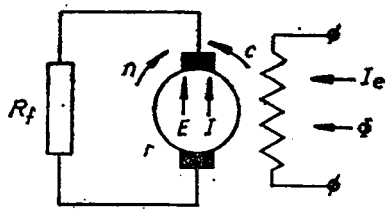



*Fig. 5.69.* Schema generatorului de curent continuu cu excitație separată, în regim de frînă electrică reostatică.

Din ecuația (1) rezultă că $C_f(V)$ respectiv $F_f(V)$, pentru $\Phi$ = constant (respectiv $I_e$ = const.) este o dreaptă; caracteristicile $F_f(V)$ avînd ca parametru $I_e$ sînt drepte în evantai (fig. 5.70).

Ecuația (2) arată că $F_f(V)$ pentru $I$ (curentul de frînare) = const. este o hiperbolă; caracteristicile $F_f(V)$ avînd $I$ ca parametru sînt reprezentate prin familia de hiperbole (fig. 5.70).

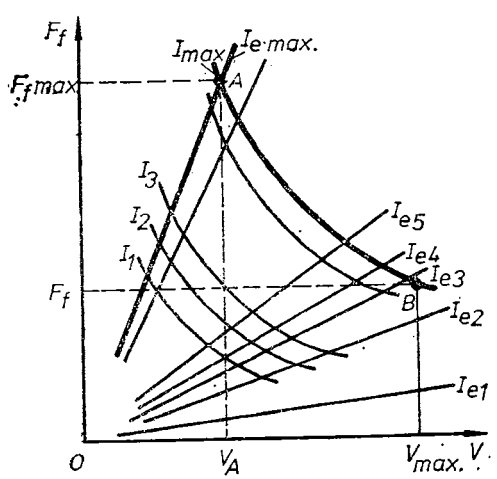



*Fig. 5.70.* Alura caracteristicilor de frînare reostatică.

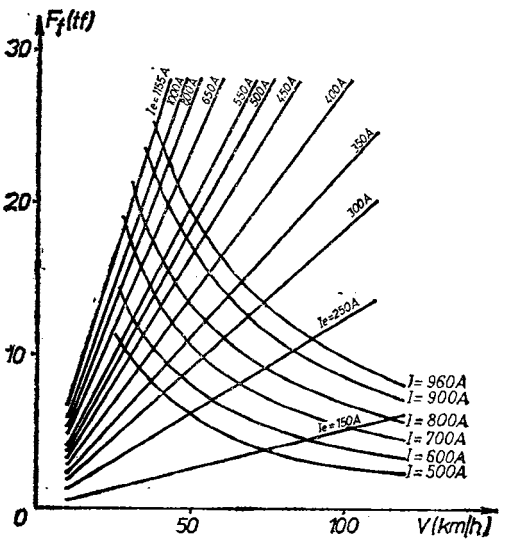



*Fig. 5.71.* Caracteristica de frînare a LE—060—EA(CFR).

Limitările caracteristicii $F_f(V)$ sînt: după $V_{max}$, după curentul debitat de rotor $I_{max}$(impus de încălzirea înfășurării indusului) și după $I_{e\,maxim}$(dictat de încălzirea înfășurării de excitație). De regulă, $I_{max}$ și $I_{e\,max}$ nu depășesc

valoarea curentului nominal în regim motor. Intersecțiile curbelor limitative determină și punctele caracteristice funcționale în regim de frînare reostatică: punctul $A$ dă $F_{f.max}$ de care este capabilă locomotiva după parametrii motorului de tracțiune și $V_A$ corespunzătoare; punctul $B$ indică $F_f$ de care este capabilă locomotiva la $V_{max}$.

*Parametrii în regim de frînă reostatică ai* LE-060-EA (CFR) sînt următorii:

— rezistența de frînare pe motor . . . . . 0,42 Ω

— curentul de frînare în regim continuu . . . . . 960 A

— forța de frînare în regim continuu . . . . . 21 tf.

— viteza de frînare în regim continuu . . . . . 45 km/h

— curentul de excitație maxim . . . . . 1000 A

Caracteristica de frînare reostatică a acestei locomotive este redată în figura 5.71.

## 5.15. CARACTERISTICILE PRINCIPALE ALE LE-060-EA (CFR)

Felul curentului . . . . . alternativ monofazat

Tensiunea nominală . . . . . 25 kV

Frecvența nominală . . . . . 50 Hz

Formula osiilor . . . . . C$_0'$—C$_0'$ (060-EA, notație CFR)

Ecartament . . . . . 1 435 mm

Lungimea între tampoane . . . . . 19 700 mm

Lungimea cutiei . . . . . 18 500 mm

Lățimea cutiei . . . . . 3 000 mm

Înălțimea cu pantograful coborît . . . . . 4 500 mm

Distanța între axele transversale ale boghiurilor . . . 10 300

Ampatamentul boghiului . . . . . 4 350

Diametrul roții motoare cu bandaj nou . . . . . 1 250

Sarcina pe osie: fără balast/cu balast . . . . . 20±2%/21±2± tf

Greutate totală și aderentă . . . . . 120 ± 2%/126±2% tf

Viteza maximă constructivă . . . . . 120 km/h

| | |
|---|---|
| Raportul de transmitere al angrenajului | 73 : 20 |
| Forţa de tracţiune maximă (demaraj) | 42 tf |
| Forţa de tracţiune uniorară | 28,7 tf |
| Forţa de tracţiune continuă | 26,7 tf |
| Viteza de regim uniorar | 67,7 km/h |
| Viteza de regim continuu | 68,7 km/h |
| Puterea uniorară | 5 400 kW |
| Puterea continuă | 5 100 kW |
| Curent uniorar | 1 250 A |
| Curent continuu | 1 180 A |

# Capitolul 6

# LOCOMOTIVE ELECTRICE CU TIRISTOARE

## 6.1. GENERALITĂȚI PRIVIND TIRISTOARELE

Ca și dioda, tiristorul își bazează funcționarea pe proprietățile joncțiunii, adică acea zonă care separă într-un disc de siliciu o parte bogată în electroni liberi de o parte săracă în electroni liberi. Din punct de vedere constructiv, tiristorul poate fi considerat ca alcătuit din trei joncțiuni $p—n$ (diode) cuplate în serie (fig. 6.1),cu precizarea că joncțiunile $p—n$ sînt asimetrice.

O joncțiune nu trebuie dopată egal (paralel) ; cînd concentrația de donori de electroni a stratului $n$ este, de exemplu, de o sută de ori mai mare decît concentrația de acceptori a stratului $p$, atunci pentru 100 electroni ce traversează joncțiunea, va fi un gol ce traversează aceiași joncțiune, adică zona $n$ va emite mult mai mulți electroni către $p$ decît goluri în sens invers. O astfel de joncțiune se zice asimetrică, iar curentul total este format în cea mai mare parte din curent de electroni și într-o mică proporție din curent de goluri. Doparea asimetrică a joncțiunilor s-a precizat pe figura 1 prin numărul de donori și acceptori pe unitatea de volum ($10^{19}$ cm$^{-3}$, $10^{16} \cdot$ cm$^{-3}$, $10^{14} \cdot$ cm$^{-3}$ $\cdots$).

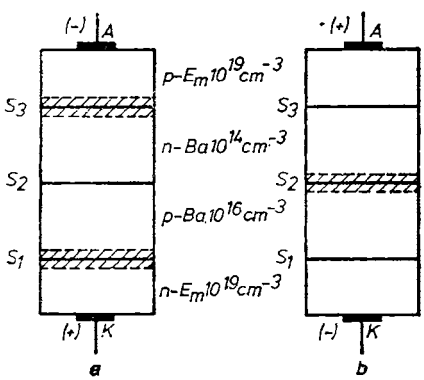



*Fig. 6.1.* Schema unui tiristor : *a* — tiristor blocat în sens invers ; *b*—tiristor-blocat în sens direct $n - Em$, donor $n$; $p - B_a$, bază $p$; $n - B_a$, bază $n$; $p - E_m$, donor $p$.

6.1.1. **Procesele de blocare inversă și de blocare directă.** Aplicînd tiristorului o tensiune cu polaritatea (—) la $A$ și (+) la $K$ (fig. 6.1, *a*), prin comparație cu dioda, rezultă că joncțiunile $S_1$ și $S_3$ sînt polarizate în sens invers (zonele figurate hașurat reprezintă staturile de baraj) și numai joncțiunea $S_2$ este polarizată în sens de conducție. Această situație corespunde tiristorului blocat în sens invers, iar caracteristica tiristorului (caracteristica inversă) este asemănătoare cu unei a diode (fig. 6.2 — ramura $S$).

Aplicînd tiristorului o tensiune cu polaritatea (+) la $A$ și (—) la $K$ (fig. 6.1, *b*), joncțiunile $S_1$, $S_3$ vor fi polarizate în sens de conducție și joncțiunea $S_2$ în sens invers ; purtătorii de sarcină mobili vor fi aspirați în stratul $S_2$ formînd aci o zonă de rezistență mare (barajul). Această situație

reprezintă tiristorul blocat în sens direct, iar caracteristica lui este redată în figura 6.2 (ramura $B$).

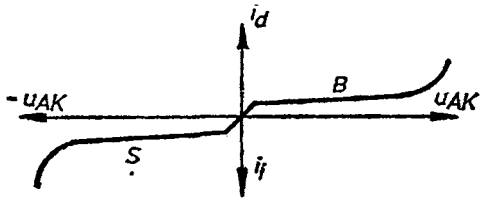



*Fig. 6.2.* Caracteristica unui tiristor blocat în sens direct: $B$ — caracteristica directă; $S$ — caracteristica inversă.

6.1.2. **Conducția.** Joncțiunile $S_1$, $S_3$ fiind dopate asimetric față de $S_2$ (zonele emițătoare-donoare sînt mai puternic dopate ca zonele de bază), purtătorii de sarcină mobili din aceste joncțiuni pot inunda joncțiunea $S_2$ și astfel să-i elimine puterea de blocaj; electronii din $S_1$ pot ajunge la $S_3$ și golurile din $S_3$ pot ajunge la $S_1$, dacă aceștia sînt în stare să distrugă barajul lui $S_2$. Această situație caracterizează tiristorul deblocat și un curent parcurge întreg tiristorul în sens direct. Trecerea de la starea blocată la starea de conducție se numește *proces de aprindere* (de amorsare sau de deblocare), iar caracteristica unui tiristor polarizat direct și deblocat este redată în figura 6.3.

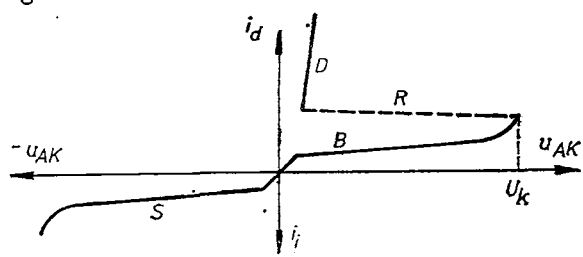



*Fig. 6.3.* Caracteristica unui tiristor deblocat: $D$ — caracteristica directă (similară unei diode deblocată); $R$ — dreapta de rezistență.

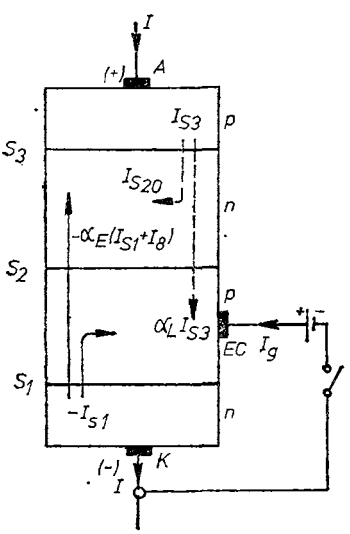



*Fig. 6.4.* Schema unui tiristor comandat (schema de deblocare).

Momentul aprinderii (deblocării) unui tiristor se poate modifica, după voie, dacă se aplică un impuls de aprindere (impuls de curent sub o anume tensiune) cu ajutorul unui electrod de comandă ($EC$); în felul acesta se ajunge la tiristorul comandat (figura 6.4), formă sub care se întîlnește în schemele practice.

Pentru înțelegerea modului de deblocare a unui tiristor comandat, în figura 6.4 s-a notat cu:

- $\alpha_L I_{S3}$ — partea de curent anodic ce traversează joncțiunea $S_3$ și avansează la joncțiunea $S_1$ sub formă de goluri;
- $\alpha_E\ (-I_{S1})$ — partea de curent catodic ce traversează joncțiunea $S_1$ și ajunge la joncțiunea $S_3$ sub formă de electroni;
- $\alpha_L$, $\alpha_E$ — factori $< 1$;
- $I_{S2.0}$ — curent de fugă.

Curentul total ce parcurge $S_2$ va fi:

$$I = \alpha_L I_{S3} + I_{S2.0} + \alpha_E I_{S1};$$

$$I = I_{S3} = I_{S1},$$

ceea ce dă $I_{S2.0} = I - I(\alpha_L + \alpha_E)$.

Joncțiunea $S_2$ este blocată cînd $I_{S2.0} > 0$, adică pentru $(\alpha_L + \alpha_E) < 1$.

Joncțiunea $S_2$ se deblochează cînd $(\alpha_L + \alpha_E) > 1$, adică $I_{S2.0}$ schimbă de sens.

Aplicînd tiristorului o tensiune cu polaritatea în sens de blocare directă (fig. 6.4) pe care o creștem în mod progresiv, mai întîi el rămîne blocat (lasă să treacă numai un curent foarte slab în sensul $A-K$ zis de întreținere), iar pentru o valoare a tensiunii $U_K$ „tensiune de basculare", sau „tensiune de amorsare", cum mai este denumită) rezistența stratului $S_2$ scade brusc (curba $R$, fig. 6.3) și curentul crește brusc (curba $D$) și căderea de tensiune la bornele tiristorului cade la o valoare de ordinul 1—1,5 V (comportare similară cu o diodă în stare de conducție).

Dacă se reia experiența precedentă, însă aplicăm impulsuri de curent $I_{g1}$, $I_{g2}$, $I_{g3}$ ··· la electrodul de comandă se constată că deblocarea are loc la tensiuni $U_{K1}$, $U_{K2}$, ··· ; caracteristica unui tiristor comandat este redată în figura 6.5.

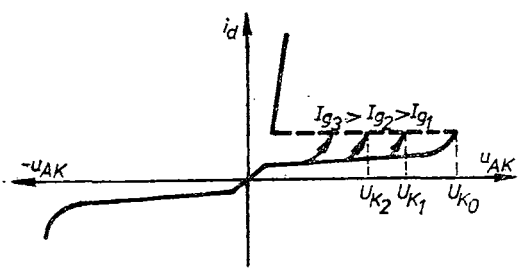



*Fig. 6.5.* Caracteristica unui tiristor pentru diferite valori ale curentului de comandă.

Deci, în funcție de valoarea impulsului de comandă deblocarea (aprinderea) tiristorului are loc la momente voite. Odată deblocat, tiristorul nu își poate lua starea de blocat decît după anularea tensiunii la borne sau reducerea curentului sub valoarea curentului de întreținere.

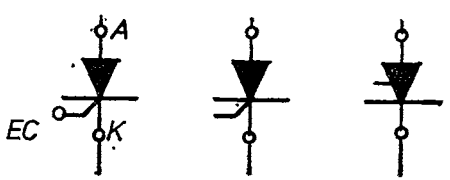



*Fig. 6.6.* Simbolul unui tiristor (folosit în scheme).

Simbolul unui tiristor, așa cum se folosește în mod curent în scheme este redat în figura 6.6

## 6.2. LEGAREA ÎN PAR ALEL ŞI ÎN SERIE A TIRISTOARELOR

Ca şi diodele, tiristoarele se pot lega în paralel şi în serie cu luarea unor precauţii speciale. La legarea în paralel, pentru echilibrarea curenţilor între ramuri tiristoarele se clasează după căderea de tensiune directă ($\Delta U$) şi se grupează astfel încît căderea de tensiune totală pe ramuri să fie aceeaşi (fig. 6.7).

La legarea în serie, echilibrarea tensiunilor pe fiecare tiristor se obţine prin montarea în derivaţie (şuntare) pe fiecare tiristor a unei rezistenţe de echilibrare ($R_e$ — fig. 6.8) de valoare mare, pentru a evita pierderi importante. Protecţia la supratensiuni se face prin montarea de filtre ($C$, $R$) în paralel pe tiristor ca şi în cazul diodelor.

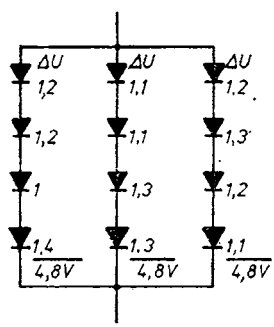



*Fig. 6.7.* Gruparea tiristoarelor în paralel.

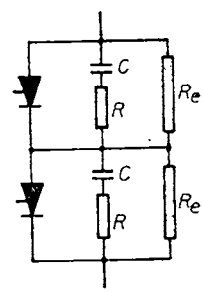



*Fig. 6.8.* Echilibrarea tensiunilor între două tiristoare legate în serie.

La legarea în serie şi paralel a tiristoarelor (diversele lor scheme de montaj) mai trebuie îndeplinită necondiţionat încă o condiţie şi anume presupune aprinderea simultană a tuturor tiristoarelor prevăzute a funcţiona în acelaşi timp. Dacă o ramură dintr-un braţ sau un tiristor dintr-o ramură nu se deblochează simultan, tiristoarele vor fi supuse la curenţi respectiv tensiuni ridicate ceea ce poate distruge instalaţia. În genere instalaţiile de comandă (aprindere) a tiristoarelor sînt electronice (transformatoare de impulsuri, cu atîtea secundare cîte tiristoare se comandă, condensatoare, rezistente, diode de blocare ...), care trebuie să asigure impulsuri de comandă de ordinul cîţiva mA ... 1A la tensiuni 3...9 V, cu toleranţa la aprindere, între două tiristoare, de maxim 2 $\mu$ s.

## 6.3. SCHEME DE MONTAJ AL TIRISTOARELOR PE LOCOMOTIVE

Ca şi în cazul diodelor, schemele de montaj a tiristoarelor în curent monofazat, sînt cele ce asigură redresarea ambelor alternanţe ale curentului alternativ, adică schema de montaj cu punct median (montajul push-pull) sau în punte. Din aceleaşi considerente ca şi la diode, pe locomotive se folo-

seşte exclusiv schema de montaj în punte cu precizarea că punţile se pot realiza în două variante :

— punte complet tiristorizată (punte simetrică), atunci cînd toate braţele punţii sînt realizate cu tiristoare ;

— punte tiristorizată mixtă (punte asimetrică), atunci cînd două braţe consecutive ale punţii sînt alcătuite din tiristoare, iar celelalte două din diode.

6.3.1. **Punte complet tiristorizată.** Schema de principiu şi diagramele tensiunilor şi curenţilor sînt redate în figura 6.9.

Pentru simplificarea reprezentării diagramelor şi stabilirii relaţiei tensiunii medii de ieşire se fac următoarele ipoteze :

— Reactanţa transformatorului $X_t = 0$, ceea ce conduce la o comutaţie instantanee ($\gamma = 0$).

— Inductanţa circuitului de ieşire (partea redresată) se consideră infinită $L_d = \infty$, ceea ce conduce la forma rectilinie a curentului.

— Se consideră unghiul de deblocare $\alpha$ de valoare finită.

Se reaminteşte că un tiristor odată deblocat (ramurile 1 + 3) conducţia nu poate fi oprită decît în momentul cînd s-a dat comandă de deblocare celuilalt tiristor cu care este conjugat (ramurile 2+4), deci un tiristor conduce şi pe porţiunea de alternanţă negativă (pînă în momentul $\pi + \alpha$ în cazul figurii 6.9). Diagrama 6.9, *b* arată variaţia tensiunii de intrare ($u_2$ de la secundarul transformatorului). Diagrama 6.9, *c* reprezintă variaţia tensiunii de ieşire (partea redresată) pentru un unghi de deblocare $\alpha < 90°$. În această situaţie tensiunea medie redresată va fi :

$$U_d = \frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \sqrt{2}\, U_2 \sin \omega t \cdot \mathrm{d}\omega t = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U \cos \alpha \qquad (1)$$

şi depinde de unghiul de deblocare $\alpha$ cum era de aşteptat.

Se observă că $U_d$ se reduce pe două căi : se micşorează porţiunea alternanţei pozitive, adică suprafaţa $S_2$ (de la $\omega t = \alpha \ldots \omega t = \pi$) ; aplicarea tensiunii negative pe porţiunea $\omega t = \pi \ldots \omega t = \pi + \alpha$ (adică suprafaţa negativă $S_1$).

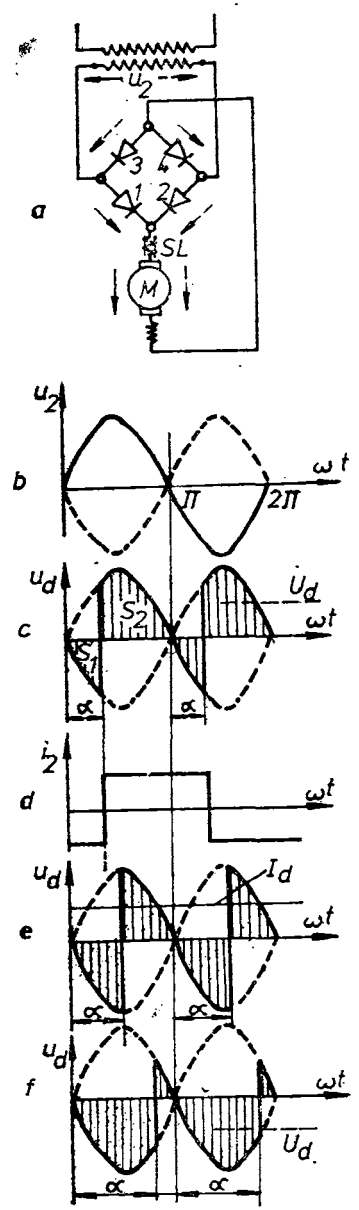



*Fig. 6.9.* Punte tiristorizată. Schema şi diagramele de tensiuni şi curenţi.

Variind continuu pe $\alpha$ rezultă o variaţie continuă a lui $U_d$ cu domeniul de reglare de la (vezi relaţia 1) :

$$\alpha = 90° \ldots \cos \alpha = 0 \ldots U_d = 0$$

$$\alpha = 0 \quad \ldots \cos \alpha = 1 \ldots U_{d\,max} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2.$$

Dacă se ţine seamă şi de comutaţie (unghiul $\gamma$), curba de variaţie a tensiunii redresate rezultă că în figura 6.10, iar relaţia între unghiul de co-

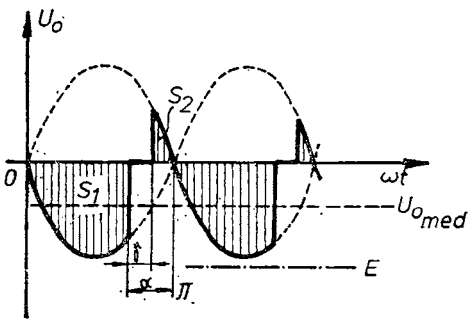



*Fig. 6.10.* Diagrama tensiunii redresate la o punte complet tiristorizată pentru un unghi $\alpha$ şi ţinînd seamă de comutaţia $\gamma$.

mutaţie $\gamma$ şi unghiul de deblocare $\alpha$ rezultă

$$\cos (\alpha + \gamma) = \cos \alpha - \frac{l\omega I_m}{\sqrt{2} U_2}.$$

Înlocuind $l\omega$ prin valoarea sa în funcţie de $X_1'$ se obţine relaţia :

$$\cos (\alpha + \gamma) = \cos \alpha - \frac{2X_1'}{m^2} \frac{I_m}{\sqrt{2}\, U_2}.$$

Pentru ambele alternanţe circuitul se închide (buclează) prin transformator (săgeata plină, sau săgeata punctată) aşa că în mod real intervine şi căderea de tensiune datorită comutaţiei şi deci tensiunea medie redresată devine :

$$U_d = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 \cos \alpha - \frac{2X_1'}{\pi m^2} I_m,$$

$X_1'$ — reactanţa primară a transformatorului ;

$m$ — raportul de transformare a transformatorului ;

$I_m$ — curentul nominal din motor.

Termenul $\frac{2X_1'}{\pi m^2} I_m$ reprezintă tocmai căderea de tensiune datorită comutaţiei.

Diagrama 6.9, *d* arată variația curentului ce rezultă în secundarul transformatorului.

Presupunînd aceleași ipoteze simplificatoare de mai sus, în figura 6.11 se tratează trei situații funcționale pentru o punte complet tiristorizată.

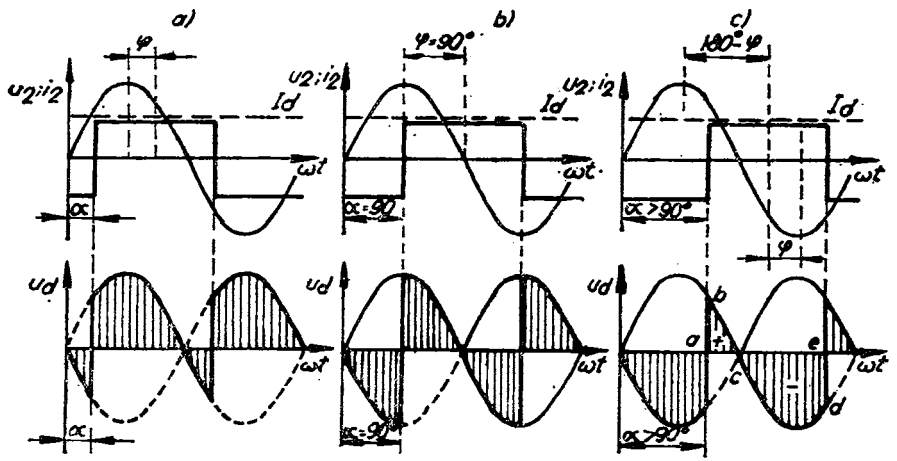



*Fig. 6.11.* Diagrama funcționării punții complet tiristorizate în regim de redresor și regim ondulor.

Diagrama 6.11, *a* repetă funcționarea pentru $\alpha < 90°$ cînd puntea tiristorizată lucrează în regim de redresare, adică transformă curentul alternativ în curent continuu, iar sarcina din circuitul redresat lucrează în regim motor. Peste sinusoida $u_2$ s-a trasat și variația curentului $i_2$ (rectangular, întrucît s-a presupus $X_d = \infty$) și de asemenea s-a reprezentat curentul ce trece prin sarcină $I_d$ (reprezentarea punctată). Distanța dintre axele de simetrie ale curbelor $u_2$, $i_2$ reprezintă defazajul $\varphi$ dintre vectorii tensiune și curent care determină factorul de putere cos $\varphi$ și se observă că pe măsură ce $\alpha$ crește, crește și $\varphi$, deci cos $\varphi$ scade (se înrăutățește).

Figura 6.11, *b* tratează cazul limită pentru $\alpha = 90°$, cînd rezultă $U_d = 0$.

Mărind în continuare $90° < \alpha < 180°$ se observă (fig. 6.35, *c*) că $U_d$ devine negativă (suprafața pozitivă *abc* < suprafața negativă *cde*), adică puntea tiristorizată își schimbă regimul de funcționare trecînd în regim de invertor adică transformă curentul continuu în curent alternativ, sarcina devine generator, iar tensiunea sa continuă livrată punții, la ieșirea din aceasta este ondulată (regimul se mai cheamă și ondulor). La trecerea din regimul redresor (sarcina este motor) la regimul invertor (sarcina este generator), pentru ca tiristoarele să fie în sens de conducție (deci puntea să lucreze) de către tensiunea electromotoare ($E$) a generatorului ($G$) este necesar ca polaritatea la puntea tiristorizată să fie schimbată. Condițiile de trecere de la regim redresor la regim ondulor sînt arătate în figura 6.12.

În regim de ondulare mărirea unghiului de deblocare ($\alpha > 90°$) conduce la ameliorarea lui cos $\varphi$.

Puntea complet tiristorizată se folosește obligatoriu în alcătuirea redresorului atunci cînd se dorește ca locomotiva să se înzestreze cu frînă electrică

recuperativă. Pentru situația cînd acest lucru nu este necesar, locomotiva trebuind să lucreze numai în regim de tracțiune, puntea complet tiristorizată nu se folosește întrucît se complică mult instalația de comandă a tiris-

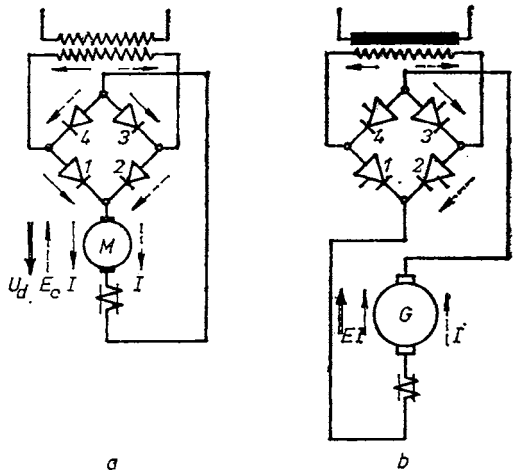



*Fig. 6.12.* Schema trecerii de la regim redresor la regim ondulor în cazul punții complet tiristorizate : *a* — regim redresor ; *b* — regim ondulor.

toarelor (numărul lor fiind mare), iar domeniul de reglare al tensiunii pe motor prin variația unghiului de deblocare $\alpha$ este restrîns de la 90° la 0°.

6.3.2. **Punte tiristorizată mixtă.** Schema de conexiuni și diagramele de variație a tensiunilor sînt redate în figura 6.13. Pentru o alternanță conduce ramura *1* (cu tiristori) și ramura *3* (cu diode), iar pentru cealaltă alternanță (figurată punctat) conduce ramura *2* (cu diode) și ramura *4* (cu tiristori). Puntea conduce deci numai în timpul $\omega t = \alpha \ldots \omega t = \pi$ ramurile $1 + 3$ și $\omega t = \pi + \alpha \ldots \omega t = 2\pi$ ramurile $2 + 4$. Pentru momentele $\omega t = 0 \ldots$ $\ldots \omega t = \alpha$ și respectiv $\omega t = \pi \ldots \omega t = \pi + \alpha$ puntea nu conduce din cauza diodelor care sînt blocate și deci $U_d = 0$, însă în motor circulă curentul $I_d$ și în acest timp datorită energiei acumulată în selful de aplatisare.

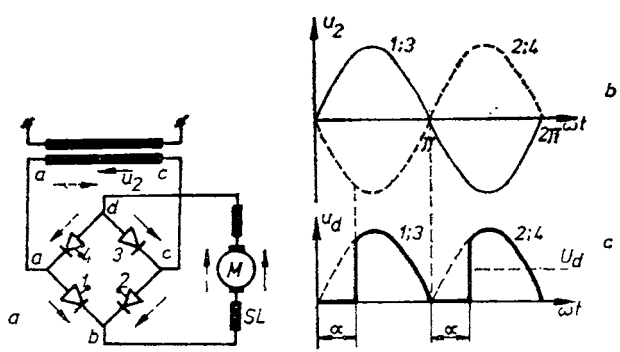



*Fig. 6.13.* Punte tiristorizată mixtă : *a* — schema de conexiuni ; *b* — variația tensiunii la secundarul transformatorului ; *c* — variația tensiunii redresate.

Buclarea curentului, în cazul punții mixte, se face prin motor și cele două brațe libere ale punții ($b—M—d—c—b$), fără să treacă prin înfășurarea

transformatorului, așa că în expresia tensiunii medii redresate nu mai intervine căderea de tensiune datorită reactanței transformatorului.

Expresia tensiunii medii redresate (în ipoteza comutației instantanee) va fi:

$$U_d = \frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2}\, U_2 \sin \omega t \cdot d\omega t = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 (1 + \cos \alpha);$$

— pentru $\alpha = 0$, $\cos \alpha = 1$ și $U_{d.max} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2$;

— pentru $\alpha = 180°$, $\cos \alpha = -1$ și $U_{d.min} = 0$.

Domeniul de reglaj la puntea tiristorizată mixtă este $0 < \alpha < 180°$ (o mare finețe la reglaj), față de $0 < \alpha < 90°$ în cazul punții complet tiristorizate, de aceea ea se aplică în exclusivitate la locomotivele cu redresoare care nu necesită frînă recuperativă. Puntea mixtă, față de cea complet tiristorizată, mai are și avantajele că numărul tiristoarelor este jumătate și ca atare se simplifică mult instalația electronică de comandă a tiristoarelor.

Admițînd $X_d = \infty$, în figura 6.14 s-a reprezentat variația rectilinie a curentului din secundarul transformatorului, pentru cazul punții mixte (6.14, *a*) și puntea complet tiristorizată (6.14, *b*) în scopul punerii în evidență a decalajului $\varphi$ între vectorii tensiune-curent, care determină factorul de putere $\lambda$ pentru cele două montaje ($\alpha$ s-a persupus același). Se observă că montajul în punte mixtă prezintă unghiul $\varphi$ mai mic (deci $\lambda$ mai mare), decît în cazul montajului punții complet tiristorizate, constituind de asemenea un avantaj.

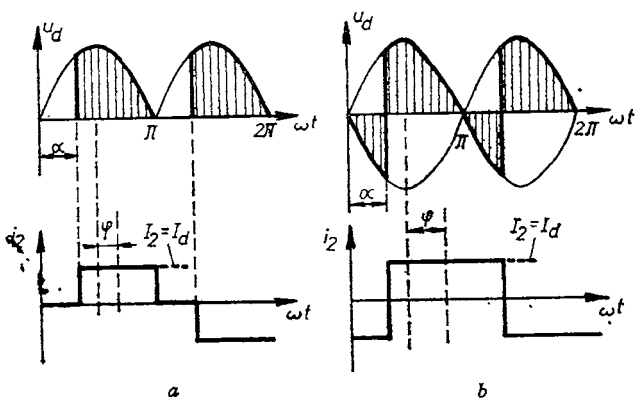



*Fig. 6.14.* Variația curentului în secundarul transformatorului: *a* — cazul punții mixte; *b* — cazul punții complet tiristorizate.

Acest lucru se poate deduce ușor știind că factorul de putere ($\lambda$) este raportul dintre puterea activă ($P_d$) și puterea aparentă ($P_1$), absorbită la primar (însă $P_2 = P_1$):

$$\lambda = \frac{P_d}{P_2}. \qquad (1)$$

În cazul punții mixte, avem :

— curentul eficace în înfășurarea secundară :

$$I_2 = \sqrt{\frac{I_d^2 (\pi - \alpha)}{\pi}} = I_d \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi}};$$

— puterea aparentă,

$$P_2 = U_2 I_2 = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_d I_d \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi}};$$

— puterea activă,

$$P_d = U_d I_d = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 I_d (1 + \cos \alpha);$$

— relația (1) devine :

$$\lambda_{pm} = \frac{2(1 + \cos \alpha)}{\sqrt{\pi (\pi - \alpha)}}. \qquad (2)$$

Prin $\lambda_{pm}$ s-a notat factorul de putere pentru montajul în punte mixtă. În cazul punții complet tiristorizată, avem

$$- P_2 = U_2 I_2 = U_2 I_d = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_d I_d;$$

$$- P_d = U_d I_d = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 I_d \cos \alpha;$$

$$- \lambda_{p.t} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cos \alpha; \qquad (3)$$

$\lambda_{p.t}$ — factorul de putere pentru montajul punte complet tiristorizată.

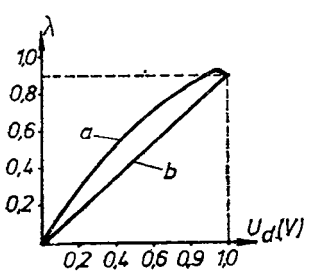



*Fig. 6.15.* Variația factorului de putere : *a* — punce mixtă; *b* —punte complet tiristorizată.

Determinînd valorile $(1 + \cos \alpha)$ din expresia $U_d$ (paragraful 3.2) și respectiv $\cos \alpha$ din expresia $U_d$ (paragraful 3.1) și introducîndu-le în relațiile (2) și (3), rezultă :

$$\frac{\lambda_{p.m}}{\lambda_{p.t}} = \frac{\pi}{\sqrt{\pi(\pi - \alpha)}}, \text{ adică } \lambda_{p.m} > \lambda_{p.t}.$$

Variația factorului de putere în funcție de tensiunea medie redresată (respectiv viteza locomotivei) pentru cele două tipuri de punți tiristorizate este reprezentată în figura 6.15.

Se observă că deşi factorul de putere în cazul punţii tiristorizate mixte ($\lambda_{p.m}$) este totdeauna mai mare decît în cazul punţii complet tiristorizate ($\lambda_{p.t}$) totuşi în zona tensiunilor mici (viteze mici) rămîne destul de coborît. Pentru ameliorarea lui $\lambda$ în acest domeniu se foloseşte reglarea unghiului de deblocare combinată cu reglarea prin amplitudine (reglarea prin graduator) sau mai frecvent prin înscrierea a mai multor punţi tiristorizate mixte.

6.3.3. **Înserierea punţilor tiristorizate mixte.** Pe locomotivele monofazate aceasta este soluţia practicată în mod curent, pentru considerentele expuse mai sus. Schema şi procesul de reglare a tensiunii sînt aceleaşi şi în cazul înserierii punţilor complet tiristorizate. Numărul punţilor ce se înseriază poate fi 2—3 maxim 4 în funcţie de tensiunea motorului şi nivelul de ameliorare ce se doreşte pentru factorul de putere.

Pentru simplificare se tratează cazul înserierii a două punţi asimetrice (fig. 6.16).

Pornirea se face prin închiderea contactorului $C_1$ cînd lucrează numai puntea $PR_1$, căreia i se aplică tensiunea $U_{2.1}$ şi tiristoarele acestei punţi se reglează prin $\alpha$ de la $\alpha = 180°$ la $\alpha = 0°$, situaţie pentru care $PR_1$ este complet deschisă, iar la motor se aplică o tensiune $U_d$ de la zero (pentru $\alpha = 180°$) pînă la $U_d = \frac{U_m}{2}$ (pentru $\alpha = 0$; $U_m$ — tensiunea nominală a motorului). Circuitul curentului pentru o alternanţă este indicat cu săgeată plină, iar pentru cealaltă alternanţă cu săgeată punctată; prin $PR_2$ curentul circulă prin diode întrucît sînt polarizate în sens de conducţie (cu toate că $C_2$ al lui $PR_2$ este deschis). Figura 6.16, *b* arată tensiunea redresată aplicată motorului pentru $\alpha = 0$; $PR_1$ complet deblocată, iar $PR_2$ nu lucrează.

Menţinînd $PR_1$ deschisă şi cu $\alpha$ reglat la $\alpha = 0°$, se închide şi $C_2$ ($PR_2$ se pune sub tensiunea $U_{2.2}$) şi se reglează progresiv de la 180° la $\alpha = 0°$. Pentru un unghi oarecare $\alpha$, figura 6.16, *c* arată $u_d$ dat numai de $PR_2$, iar figura 6.16, *d* indică tensiunea ce se aplică la motor de $PR_1$ cu $\alpha = 0$ şi $PR_2$ deschis cu $\alpha$.

În sfîrşit, pentru cazul $\alpha = 0$ şi la $PR_2$, figura.10, *e* arată tensiunea totală la motor cu ambele punţi complet deschise.

Aşa cum s-a subliniat legarea în serie a mai multor punţi conduce la îmbunătăţirea factorului de putere, faţă de schema cu un singur redresor.

6.3.4. **Determinarea factorului de putere la punţile tiristorizate mixte înseriate.** (fig. 6.16). Pentru stabilirea mai uşoară a relaţiilor se consideră premizele simplificatoare $X_t = 0$ (comutaţie instantanee) $X_d = \infty$ (variaţie rectangulară a curentului).

Puterea medie redresată, care este determinată de tensiunea medie redresată (respectiv tensiunea eficace aplicată), diferă pentru fiecare etapă de funcţionare (succesiunea de lucru a punţilor), la acelaşi curent absorbit de motor.

*a*) Puntea $PR_1$ în funcţiune şi pentru reglaj $0 < \alpha < \pi$:

Puterea redresată

$$P_{d1} = U_d I_d = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 I_d (1 + \cos \alpha); \qquad (1)$$

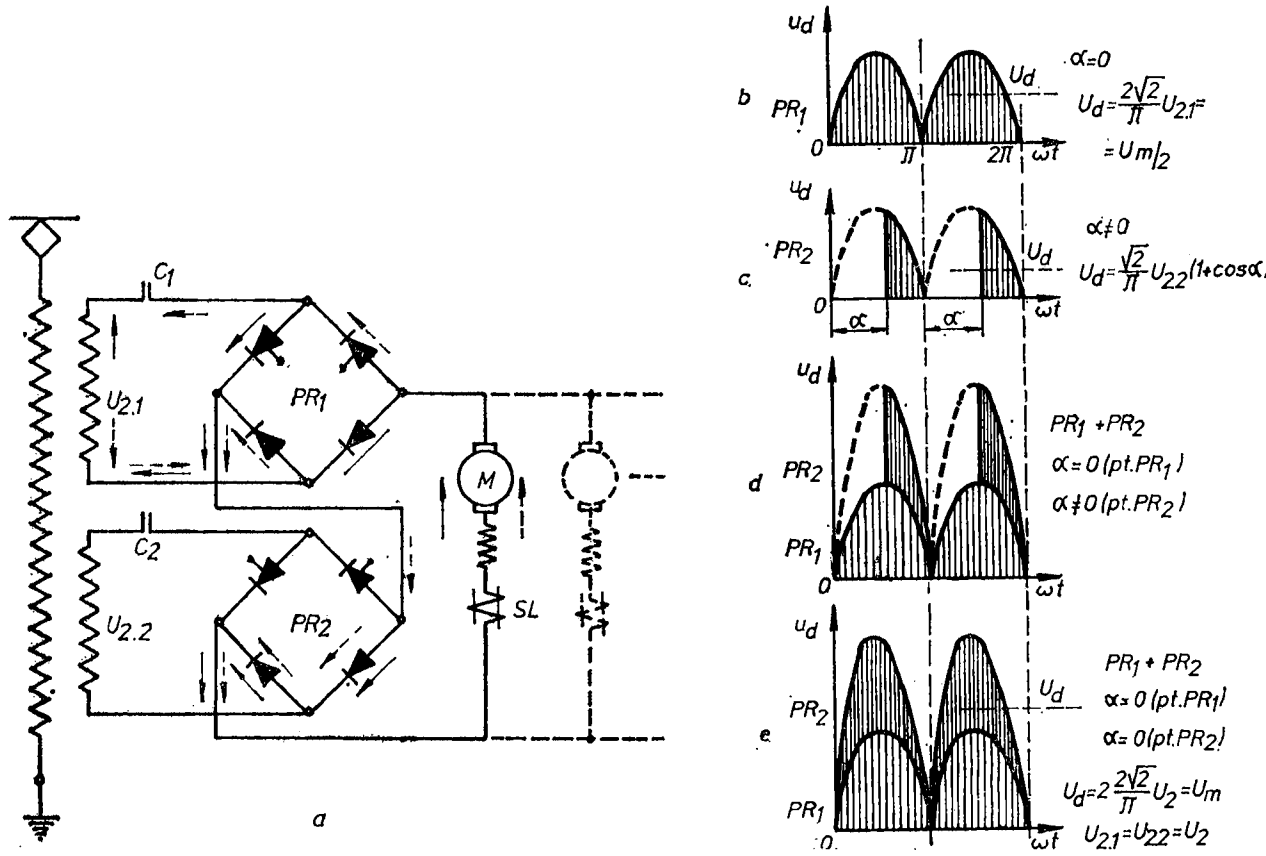



*Fig. 6.16.* Înserierea a două punți tiristorizate mixte: *a* — punte mixtă; *b* — realizarea tensiunii redresate.

Pentru $\alpha = 0$

$$P_{d1} = U_{d0} I_d = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 I_d; \tag{2}$$

$U_2$ — se va nota tensiunea eficace a fiecărei înfășurări.

*b*) Puntea $PR_1$ se menține complet deschisă ($\alpha = 0$) și se închide $C_2$ introducînd în funcțiune și $PR_2$, reglînd $0 < \alpha < \pi$:

$$P_{d2} = (U_{d0} + U_d) I_d = \left[\frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 + \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 (1 + \cos \alpha)\right] I_d = \tag{3}$$

$$= \frac{\sqrt{2}}{\pi} (3 + \cos \alpha) U_2 I_d;$$

Pentru $\alpha = 0$

$$P_{d2} = 2U_{d0} I_d = 2 \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 I_d. \tag{4}$$

*c*) În ipoteza că ar mai exista și $PR_3$, $PR_4$ ... care intră în funcțiune succesiv:

$$P_{d3} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} (5 + \cos \alpha) U_2 I_d \tag{5}$$

$$P_{d3} = 3 \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 I_d \qquad \text{(pentru } \alpha = 0) \tag{6}$$

$$P_{d4} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} + (7 + \cos \alpha) U_2 I_d \tag{7}$$

$$P_{d4} = 4 \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 I_d \qquad \text{(pentru } \alpha = 0). \tag{8}$$

. . .

Stabilirea puterii primare absorbită din rețea de înfășurarea primară a transformatorului necesită determinarea curentului eficace la primar cu precizarea că acesta este suma curenților tuturor înfășurărilor secundare.

În figura 6.17 s-a reprezentat variația curentului în secundar.

Valoarea eficace,

$$I_2 = \sqrt{\frac{I_d^2 (\pi - \alpha)}{\pi}}, \qquad \text{pentru } 0 < \alpha < 180; \tag{9}$$

$$I_2 = I_d, \text{ pentru } \alpha = 0. \tag{10}$$

Variația curentului primar este redată în figura 6.18, pentru lucrul succesiv al punților.

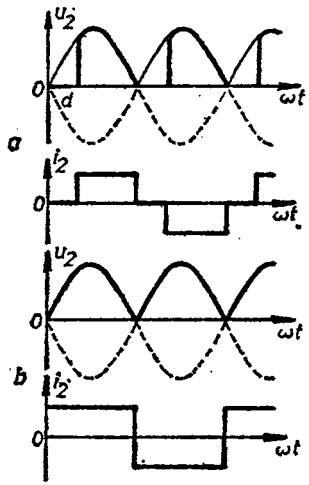



*Fig. 6.17.* Variația curentului în secundarul transformatorului: *a* — cazul reglării $0 < \alpha < \pi$; *b* — reglarea $\alpha = 0$.

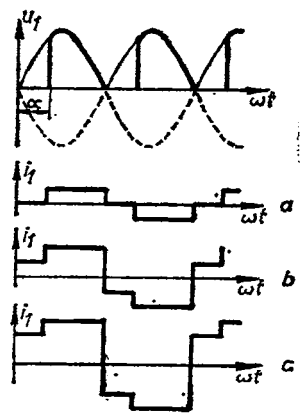



*Fig. 6.18.* Variația curentului în primarul transformatorului; *a* — o singură punte în funcțiune; *b* — înserierea și a punții doi; *c* — includerea în serie și a celei de a treia punți ...

Figura 6.18, *a*, $PR_1$ în funcțiune :

$$I_1 = \frac{1}{K_t}\sqrt{\frac{I_d^2 \cdot 0 + I_d^2(\pi - \alpha)}{\pi}} = \frac{1}{K_t} I_d \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi}}, \qquad \text{pentru } \alpha = \text{val. finită} \tag{11}$$

$$I_1 = \frac{1}{K_t} I_d, \qquad \text{pentru } \alpha = 0, \tag{12}$$

$K_t$ — raportul de transformare al transformatorului.

Figura 6.18, *b*, intră în funcțiune și $PR_2$ ($PR_1$ rămîne deschisă și $\alpha=0$) :

$$I_1 = \frac{1}{K_t}\sqrt{\frac{I_d^2 + 4I_d^2(\pi - \alpha)}{\pi}} = \frac{1}{K_t} I_d \sqrt{\frac{4\pi - 3\alpha}{\pi}}; \tag{13}$$

$$I_1 = \frac{1}{K_t} \cdot 2\, I_d. \tag{14}$$

Figura 6.18, *c*, intră în funcțiune și $PR_3$ ($PR_1$, $PR_2$ deschise și $\alpha=0$) :

$$I_1 = \frac{1}{K_t} I_d \sqrt{\frac{9\pi - 5\alpha}{\pi}}; \; I_1 = \frac{1}{K_t} \cdot 3\, I_d. \tag{15}$$

⋮

Puterea aparentă a înfășurării primare fiind:

$$P_1 = U_1 I_1 = K_t U_2 I_1 = K_t \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_{d0} I_1, \tag{16}$$

pentru $PR_1$ în funcție va rezulta:

$$P_1 = K_t U_2 I_1 = K_t U_2 \frac{1}{K_t} I_d \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi}} = U_2 I_d \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi}} \tag{17}$$

sau,

$$P_1 = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_{d0} I_d \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi}}. \tag{18}$$

Introducînd în circuit și $PR_2$ rezultă:

$$P_1 = U_2 I_d \sqrt{\frac{4\pi - 3\alpha}{\pi}}, \tag{19}$$

sau

$$P_1 = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_{d0} I_d \sqrt{\frac{4\pi - 3\alpha}{\pi}}. \tag{20}$$

⋮

Cu relațiile stabilite mai sus se poate determina factorul de putere ($\lambda$):

— $PR_1$ în funcțiune, folosind relațiile (2) și (18),

$$\lambda = \frac{P_{d1}}{P_a} = \frac{\frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 I_d}{\frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_{d0} I_d \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi}}} = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{\pi(\pi - \alpha)}} \cdot \frac{U_d}{U_{d0}}, \tag{21}$$

sau din (1) cu (18),

$$\lambda = \frac{\sqrt{2}(1 + \cos\alpha)}{\sqrt{\pi(\pi - \alpha)}}. \tag{22}$$

În ambele relații (21), (22) pentru

$$\alpha = 0 \ldots \lambda = \frac{2\sqrt{2}}{\pi}. \tag{23}$$

— Deschizînd și reglînd și $PR_2$, similar rezultă :

$$\lambda = \frac{P_{d2}}{P_1} = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{(4\pi - 3\alpha)}} \cdot \frac{U_{d0} + U_d}{U_{d0}}, \tag{24}$$

sau

$$\lambda = \frac{3\sqrt{2} + \sqrt{2}\cos\alpha}{\sqrt{(4\pi - 3\alpha)}}; \tag{25}$$

pentru $\alpha = 0$,

$$\lambda = \frac{2\sqrt{2}}{\pi}.$$

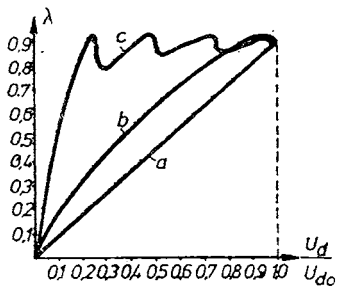



*Fig. 6.19.* Variația factorului de putere la punți tiristorizate mixte ; curba *a* — un redresor tiristorizat ; curba *b* — un redresor tiristorizat mixt ; *c* — patru punți tiristorizate mixte înseriate.

Raționamentul se continuă și pentru $PR_3$, $PR_4$ ...

Reprezentarea grafică a factorului de putere (relațiile 21, 24 ...) în funcție de valoarea medie a tensiunii redresate ($U_d/U_{d0}$) este redată în diagrama din figura 6.19, din care rezultă ameliorarea factorului de putere global (crește cu numărul punților înseriate) și de asemenea îmbunătățirea lui în domeniul tensiunilor (respectiv vitezelor) mici. Întrucît sporirea numărului punților de înseriat evident complică schema de comandă a tiristoarelor și de asemenea implică secționarea înfășurării secundare a transformatorului, în mod practic numărul punților se limitează la 2—3 maximum 4.

## 6.4. AVANTAJELE ȘI DEZAVANTAJELE APLICĂRII TIRISTOARELOR PE LOCOMOTIVELE MONOFAZATE

Ca avantaje mai importante se menționează :

— Prin modificarea unghiului de deblocare se obține variația tensiunii redresate (reglaj prin „unghiul de aprindere" sau de „deblocare"), de la valoarea zero la valoarea ei nominală. Această soluție permite eliminarea graduatorului și a înfășurării de reglare ceea ce conduce la o simplificare a transformatorului cu un cîștig evident în greutatea transformatorului și diminuarea cheltuielilor de întreținere.

— Reglarea unghiului de deblocare putînd lua un număr infinit de valori (reglaj continuu), rezultă un reglaj continuu al forței de tracțiune care poate fi menținută ușor la $F_{max}$ limitată de aderență, sporind în acest mod performanțele locomotivei. În planul $F(V)$ nu mai apar multe caracteristici (nu mai avem reglaj prin amplitudine, lipsind treptele graduatorului) ci o curbă

înfășurătoare a forței maxime de tracțiune. O reprezentare a acestui avantaj este redată în diagrama din figura 6.20.

— Automatizarea și optimizarea conducerii locomotive se rezolvă în condiții mult mai ușoare, fără adaos de echipament suplimentar prea numeros. Se poate face reglaj la tensiune impusă (respectiv viteză), se poate regla la curent impus (forță de tracțiune) sau reglaj combinat astfel că locomotiva cu tiristoare alege regimul său de funcționare în funcție de mărimea impusă de mecanic.

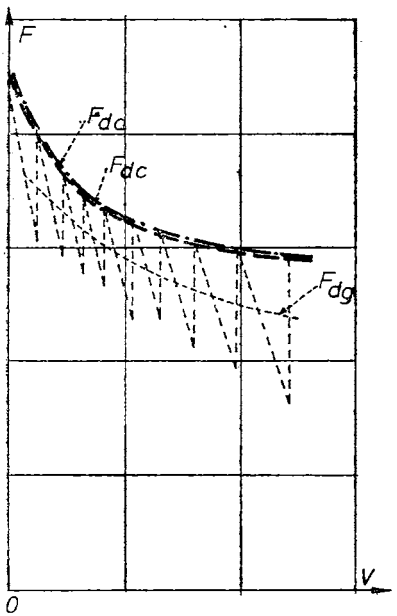



*Fig. 6.20.* Alura caracteristicii de tracțiune în diverse situații de reglare: $F_{d.a}$ — forța de demaraj limitată de aderență; $F_{d.c}$ — forța de demaraj cu reglare continuă a tensiunii pe motor; $F_{d.g}$ — forța medie de demaraj cu reglare în trepte (prin graduator).

— Alimentarea în curent alternativ, monofazat permite o stingere naturală a tiristoarelor cînd se inversează polaritatea la bornele punții, în cazul punților mixte (datorită brațului cu diode), sau stingerea tiristoarelor celor două ramuri cînd se dă comandă de deblocare tiristoarelor de celelalte ramuri pentru cazul punților complet tiristorizate.

Dezvoltarea într-un ritm destul de lent a aplicării tiristoarelor pe locomotivele monofazate este explicată în momentul de față prin:

— tehnologia de fabricație mai complicată și delicată;

— preț încă ridictat la ora actuală;

— element fragil, deci cu o fiabilitate mai redusă, care în cazul unei defecțiuni de protecție poate distruge întreaga punte;

— utilizarea tiristoarelor reclamă folosirea unei comenzi electronice, echipament care nu a dat satisfacție deplină pe locomotive.

Se scontează ca într-un viitor apropiat toate aceste deficiențe să fie depășite și locomotiva cu tiristoare să ia definitiv locul locomotivelor cu diode. De altminteri în prezent sînt realizări în acest domeniu cu rezultate bune.

## 6.5. FRÎNAREA ELECTRICĂ RECUPERATIVĂ

Trecerea de la regim motor la regim generator cu recuperare pe linia de contact este posibilă la locomotivele monofazate 50 Hz cu îndeplinirea următoarelor condiții (fig. 6.21).

— Dacă motorul de tracțiune este tip serie, în regim de frînă recuperativă se va schimba de excitație în generator cu excitație separată.

Pentru a putea vehicula energia dinspre generatorul de curent continuu spre rețeaua de curent monofazat, puntea trebuie să fie complet tiristorizată

și în acest caz lucrează în regim de ondulor monofazat. Tensiunea electromotoare a generatorului (cu sensul schimbat față de tensiunea aplicată în regim motor), trebuind să aibă același sens cu tensiunea medie ondulată, va trebui să se utilizeze partea inferioară a sinusoidelor (alternanțele negative) ceea ce se obține prin reglarea unghiului de deblocare $90° < \alpha < 180°$ (fig. 6.22).

— Puntea tiristorizată, pentru a putea funcționa, va trebui să fie în sens de conducție față de tensiunea $E$ a generatorului, ceea ce se obține inversînd polaritatea la punte (fig. 6.21).

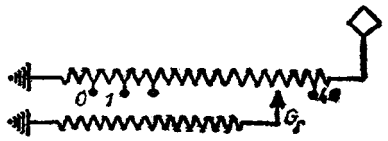
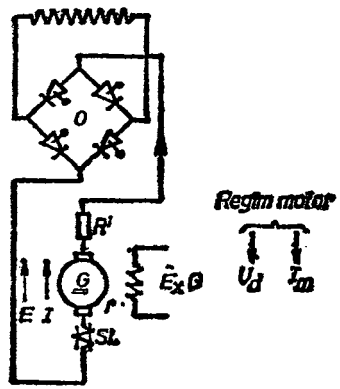



*Fig. 6.21.* Schema în regim de recuperare a unei locomotive cu tiristoare.



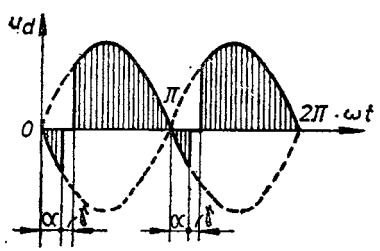




*Fig. 6.22.* Funcționarea tiristorului în regim de ondulor.

— Tensiunea care rezultă la pantograf $U_{panto} > U_{LC}$ se obține în orice moment, printr-un sistem complex de reglare al recuperării.

*Tensiunea medie ondulată* (mărimea de ieșire din punte) care se aplică la secundarul transformatorului va fi (fig. 6.22):

$U_0 = \frac{-S_1 + S_2}{\pi}$, $S_1$, $S_2$ fiind suprafețele haşurate a căror valoare rezultă:

— dacă neglijăm comutația ($\gamma = 0$),

$$U_0 = \frac{1}{\pi}\int_0^{\alpha} -\sqrt{2}\,U_2 \sin \omega t.\mathrm{d}.\,\omega t + \frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t.\mathrm{d}.\omega t =$$

$$= \frac{-\sqrt{2}}{\pi} U_2 \Big| - \cos\,\omega t \Big|_0^{\alpha} + \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 \Big| - \cos \omega t \Big|_{\alpha}^{\pi} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 (\cos \alpha - 1 +$$

$$+ 1 + \cos \alpha) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cos \alpha;$$

— dacă se ține seamă și de comutație (unghiul $\gamma$), rezultă :

$$U_0 = \frac{1}{\pi}\int_0^{\alpha} - \sqrt{2}\, U_2 \sin \omega t . \mathrm{d}.\omega t + \frac{1}{\pi}\int_{\pi-(\alpha-\gamma)}^{\pi} \sqrt{2}\, U_2 \sin \omega t . \mathrm{d}.\omega t =$$

$$= \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 \frac{\cos \alpha - \cos (\alpha - \gamma)}{2}.$$

*Curentul recuperat* are ca expresie, $I = \frac{E - U_0}{R}$ de unde rezultă că poate fi reglat (odată cu $I$ se modifică și cuplul de frînare, $C_f = K \Phi I$ și respectiv forța de frînare, $F_f = K\ C_f$) prin :

— Variația excitație generatorului, $E = K \Phi V$ ; fluxul (respectiv curentul de excitație) are două limite : $\Phi_{min}$ cel corespunzător la $V_{max}\left(\Phi_{min} = \frac{E}{K V_{max}}\right)$ și $\Phi_{max}$ limitat de încălzirea polilor principali ai motorului.

— Variația lui $U_0 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 \cos \alpha$, care se obține prin reglarea continuă a unghiului de deblocare a tiristoarelor.

— Variația tensiunii transformatorului (modificarea raportului $K_t$ de transformare) prin graduator, dacă locomotiva este prevăzută cu graduator.

$R$ în relația curentului este $R = r + R'$, unde $r$ este rezistența indusului mașinii și a selfului de aplatisare, $R'$ — rezistență de protecție (stabilizare) necesară limitării curentului debitat de generator în procesul regimurilor tranzitorii ; la desprinderea pantografului de pe firul de contact, $U_{LC} = 0$, iar generatorul are regim de funcționare în scurtcircuit fiind obligat să debiteze un curent $I$ exagerat de mare.

Frîna recuperativă, datorită modului de reglare menționat, poate lucra pînă la oprirea trenului, așa cum rezultă și din figura 6.23 (reprezentarea grafică a expresiei curentului).

$E$ fiind fixat prin condițiile de viteză ($V$) și excitație ($\Phi$), curentul $I$ poate fi reglat prin $U$. Se poate păstra $RI = \text{const.}$ ; $I = \text{const.}$ se poate menține pentru orice valoare a lui $E$, chiar pentru $E = 0$ (oprirea locomotivei), deci forța de frînare se exercită pînă la oprire.

Menținerea forței de frînare pînă la oprire mai rezultă sugestiv și din examinarea figurii 6.24.

Pentru o excitație dată ($I_{e1}$) și o viteză ($V_1$) oarecare, f.e.m. va fi $E_1$ și curentul de frînare $I_1$, rezultînd un cuplu de frînare corespunzător ; $U(I)$ pentru o reglare $\alpha_1$ este redată prin dreapta $D_1$.

Presupunînd că $V_1$ scade, $I_{e1}$ rămîne constant, f.e.m. va deveni $E_2$, iar pentru a menține același $I_1$ se va regla $\alpha$ la $\alpha_2$ obținîndu-se dreapta $D_2$ care la intersecția cu $E_2$ va determina pe $I_1$. Viteza a scăzut, însă curentul debitat rămînînd constant, cuplul de frînare va fi același.

Dacă $V = 0$, $E_3 = 0$ (axa absciselor) și mărind în continuare pe $\alpha$ la $\alpha_3$ se obține $D_3$ a cărei intersecție cu $E_3$ dă încă pe $I_1$, deci cuplul de frînare constant.

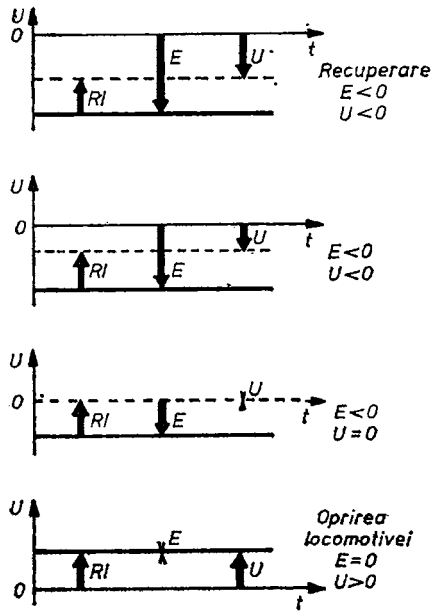



*Fig. 6.23.* Variația tensiunii la $I$ constant.

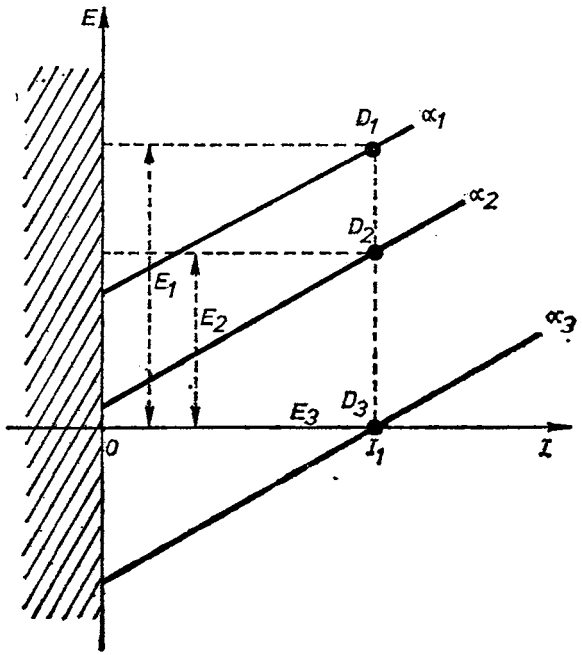



*Fig. 6.24.* Menținerea forței de frînare pînă la oprire.

*Factorul de putere* în regim de recuperare se definește prin raportul puterii active și puterii aparente la primarul transformatorului.

$$\lambda = \frac{P}{P_a}. \tag{1}$$

Puterea activă,

$$P = U_{0\text{-}med} \cdot nI = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 \cos \alpha \, . nI \tag{2}$$

(s-a considerat comutație instantanee).

Puterea aparentă,

$$P_a = U_1 I_1 = K_t U_2 \cdot \frac{1}{K_t} nI. \tag{3}$$

Ecuația (1) devine,

$$\lambda = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cos \alpha. \tag{4}$$

În ecuațiile de mai sus, s-a notat:

$n$ — numărul mașinilor (generatoarelor) legate în paralel;

$I$ — curentul debitat de generator;

$U_2$ — tensiunea eficace în gol la secundarul transformatorului.

S-a aproximat curentul mediu al mașinilor $nI = I_2 = I_1$.

Dacă se consideră o locomotivă la care forța de frînare se menține constantă prin reglarea unghiului de deblocare $\alpha$ în funcție de viteză, reprezentarea grafică a ecuației (4) în funcție de $\alpha$ este o dreaptă, ca în figura 6.25 ($\alpha$ se variază de la $\alpha_{min}$ pentru care tensiunea la bornele ondulorului este maximă, la = 90° pentru care tensiunea la bornele ondulorului se anulează).

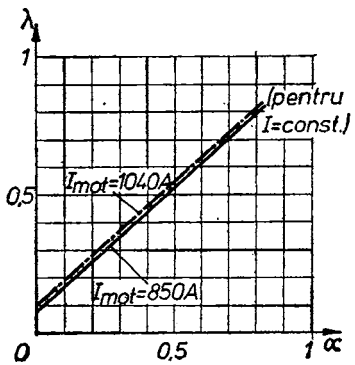



*Fig. 6.26.* Factorul de putere în recuperare în funcție de $\alpha$ la $I_{recuperat}$ = const.

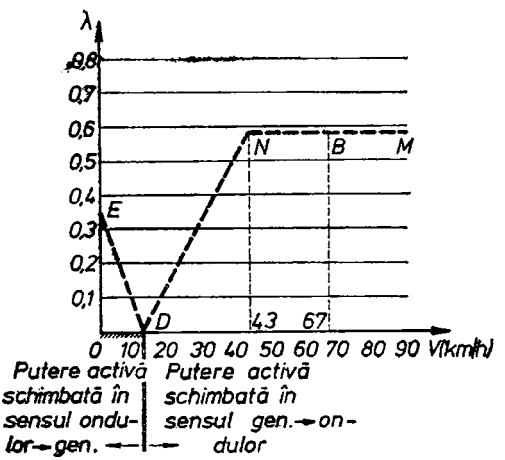



*Fig. 6.26.* Factorul de putere în recuperare în funcție de $V$, la $I_{recuperat}$ = const.

Variația lui λ cu viteza ($V$) arătată în figura 6.26 dă o imagine mai reală asupra recuperării.

În prima etapă de reglare se menține $\alpha$ = const. la valoarea sa minimă și reglarea frînării se face prin excitația generatorului (reprezentarea ecuației 2 este paralela $MB$) și în continuare prin graduator (porțiunea $BN$, dacă locomotiva are graduator).

În etapa a doua, de la o anume viteză minimă la care s-a ajuns prin reglarea de mai sus, se trece la reglarea prin variația unghiului de deblocare $\alpha$ al tiristoarelor, rezultînd segmentele de dreaptă $ND$ și $DE$. Într-adevăr prin reglarea lui $\alpha$, λ ($V$) este lineară, aceasta rezultînd din relațiile:

$$\lambda = \frac{P}{P_a} = \frac{U_{0\,med} \cdot nI}{U_2 \cdot nI} = \frac{U_{0\,med}}{U_2}; \tag{5}$$

$$K \Phi V = U_0 + RI = \lambda U_2 + RI. \tag{6}$$

Însă $\Phi$ este menținut constant, deci și $U_2$ respectiv $I$, așa că relația (4) devine :

$$V = a\,\lambda + b, \tag{7}$$

deci $\lambda(V)$ are variație lineară.

După cum s-a menționat, pentru o valoare apropiată de 90° tensiunea medie a ondulorului se anulează apoi se inversează astfel că puterea activă se schimbă ondulor și generator și ca urmare $\lambda$ descrește linear cu $V$ — porțiunea $ND$ — pînă se anulează, apoi crește din nou linear (în valoare absolută) — porțiunea $DE$ — în timp ce $V$ descrește pînă la zero.

Așa cum se observă și din figura 6.26 (aceasta corespunde unei locomotive monofazate cu redresare înzestrată cu frînă recuperativă (LE-BB 16 656, SNCF), factorul de putere global în recuperare este destul de scăzut și mai ales în zona vitezelor mici.

*Puterea recuperată* este determinată de puterea activă $P$ (relația 2) fiindcă aceasta este produsă de generatoare. Dacă se neglijează consumul de putere în serviciile auxiliare și pierderile în fier ale transformatorului, rezultă expresia puterii recuperate :

$$P = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 \cos\alpha \,.\, nI.$$

Dacă se ține seamă de factorul de putere scăzut în recuperare și de armonicele mai numeroase și de amplitudini mai mari generate de tiristoare, care introduc un regim deformant (de tensiune și curent) în rețea, în final se ajunge la o energie recuperată de valoare redusă care, pînă în prezent, nu justifică dotarea acestor locomotive cu recuperare.

*Frîna recuperativă de pe LE-060-EB*$_1$. Un exemplar din locomotivele CFR (fabricație *ASEA* din 1967) este dotat cu frînă electrică recuperativă a cărei schemă de principiu este redată în figura 6.27.

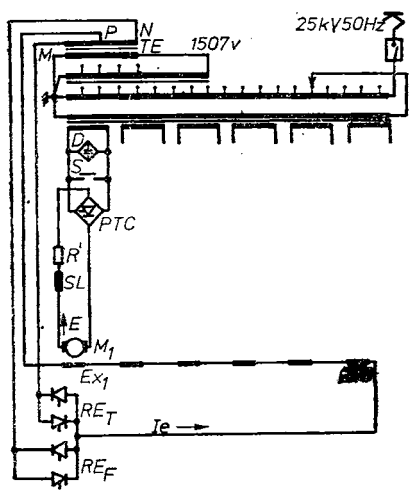



*Fig. 6.27.* Schema în regim de frînă recuperativă a LE—060—EB (CFR).

Motoarele de tracțiune sînt cu excitație separată (și în regim de tracțiune), așa că în regim de recuperare se schimbă numai polaritatea indusului față de puntea complet tiristorizată (*PTC*). Alimentarea înfășurărilor de excitație separate ($E_{x1}$, $E_{x2}$ ... care sînt înseriate) se face de la redresorul tiristorizat $RE_T$ pentru regimul tracțiune și $RE_F$ pentru regimul frînare, ambele sînt în montaj antiparalel pentru ca sensul curentului de excitație ($I_e$) să fie diferit la regimul tracțiune și regimul frînare. Alimentarea redresoarelor de excitație se face de la transformatorul de excitație *TE* a cărei înfășurare *MPN* este cuplată electromagnetic pe înfășurarea transformatorului de încălzire. Reglarea fluxului generatorului (variația lui $I_e$) se

face prin variația unghiului de deblocare a tiristoarelor $RE_T$, respectiv $RE_F$.

Sistemul complex de reglare a frînei recuperative comportă un sistem de reglare analogic pentru comanda punților complet tiristorizate și un sistem digital pentru reglarea graduatorului. Schema-bloc a sistemului de reglare este prezentată în figura 6.28.

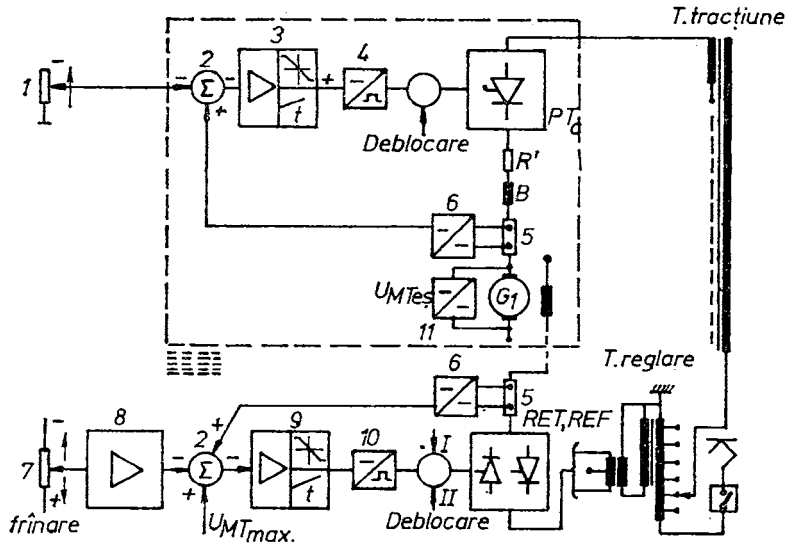



*Fig. 6.28.* Schema—bloc a reglării frînei recuperative la LE—060—EB (CFR) : *1* — potențiometru pentru afișarea curentului rotoric (de frînare) : *2* — punct de însumare a curenților; *3* — amplificatorul regulatorului de curent pentru $G_1$; *4* — dispozitiv de comandă prin impulsuri a tiristoarelor; *5,6* — șunt și traductor de curent; *7* — potențiometru pentru afișarea curentului de excitație; *8* — amplificator; *9* — amplificatorul regulatorului curentului de excitație; *10* — dispozitiv de comandă prin impulsuri a tiristoarelor de excitație; *11* — aparat de măsură a tensiunii; *PTC* — puntea complet tiristorizată principală; $RE_T$, $RE_F$— redresor tiristorizat pentru excitație (regim tracțiune, regim frînare).

La trecerea de la regimul de tracțiune la cel de frînare, graduatorul primește comandă de creștere a pozițiilor pînă la treapta 27 pentru a se putea obține un cuplu de frînare cît mai mare în zona vitezelor crescute.Pe această poziție fixă a graduatorului se dă semnalul de deblocare pentru tiristoarele *PTC* și $RE_F$ (pentru inversarea curentului de excitație).

Pentru curentul rotoric (de frînare) se afișează o valoare de referință și o buclă de reglare ce acționează pe semnalul de ieșire al regulatorului de curent, comandă dispozitivul de comandă cu impulsuri al *PTC* și ca urmare tensiunea $U_0$ (în funcție de $U_{LC}$ care este parametru de comparație).

Excitația generatorului se reglează printr-o a doua buclă, pornindu-se de la un $I_e$ afișat (de referință), după principiul primei bucle de reglare.

## 6.6. CALCULUL ŞI TRASAREA CARACTERISTICILOR DE TRACŢIUNE F(V) LA LOCOMOTIVELE CU REDRESOARE

Procedeul este identic cu cel folosit la locomotiva de curent continuu, tipul motorului de tracţiune fiind acelaşi şi ca atare se porneşte de la caracteristicile $n(I)$ şi $C(I)$ ale motorului considerate cunoscute şi furnizate de fabricant. Se face menţiunea că treptele de tensiune $U$ aplicate la motor (pentru fiecare tensiune rezultînd o caracteristică de tracţiune) depind de modul de reglare a tensiunii folosit pe locomotivă.

În cazul reglajului de tensiune prin amplitudine (cazul locomotivelor cu graduator), tensiunea pe motor $U_m$ rezultă din relaţia :

$$U_m = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 - a - \left(\frac{N}{\pi}\frac{2X_1'}{m^2} + N R_2' + R_{SL}\right) I_m, \qquad (10)$$

în care $U_2$ este tensiunea în gol la secundarul transformatorului pentru poziţia respectivă a graduatorului ;

$a$ — căderea de tensiune în redresor ;

$X_1'$ — reactanţa transformatorului văzută din primar, care variază cu treapta graduatorului (deci trebuie luat $X_1'$ corespunzător lui $U_2$) ;

$m = U_1/U_2$ — raportul de transformare ;

$N$ — numărul de motoare în paralel ;

$R_2'$ — rezistenţa totală a transformatorului văzută din secundar ;

$R_{SL}$ — rezistenţa selfului de aplatisare.

Pentru cazul reglării prin unghiul de deblocare $\alpha$, iar puntea de redresare complet tiristorizată (comandă simetrică) :

$$U_m = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 \cos\alpha - a - \left(\frac{N}{\pi}\frac{2X_1'}{m^2} + R_2' + R_{SL}\right) I_m$$

(termenii $U_2$, $X_1'$, $m$, $R_2'$ sînt în acest caz constanţi).

În cazul reglării prin unghiul de deblocare $\alpha$, însă puntea de redresare tiristorizată mixtă (comandă asimetrică) :

$$U_m = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 (1 + \cos\alpha) - a - (NR_2' + R_{SL}) I_m.$$

Pentru reglajul discontinuu, reprezentarea caracteristicilor $U(I)$ sînt drepte uşor căzătoare (fig. 6.29, *a*). În cazul reglajului continuu (reglare prin $\alpha$) reţeaua de caracteristici $U(I)$ acoperă tot planul, adică o infinitate ; în mod practic se trasează, spre exemplu, cele care corespund variaţiilor din 10° în 10°.

Deducerea rețelei de caracteristici $E(I)$ — f.e.m. a motorului în funcție de curentul $I$ ce îl traversează — pentru o aceeași treaptă de graduator (pe fig. 6.29 s-au trasat trei trepte de reglare) rezultă din relația :

$$E = U - b - r_i I,$$

$b$ este căderea de tensiune la perii ;

$r_i$ — rezistența totală a motorului ($PA$, $PP$, indus).

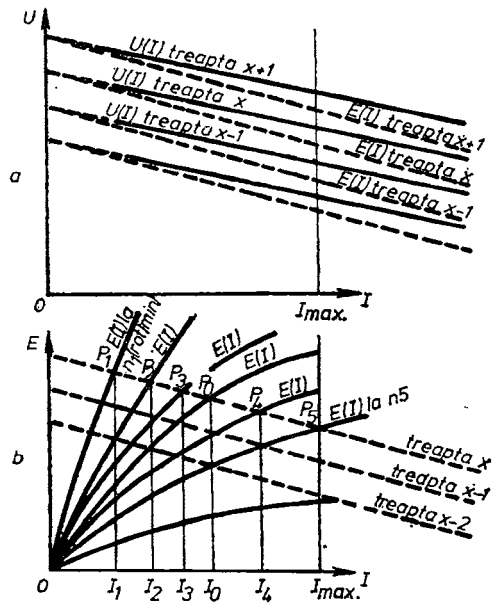
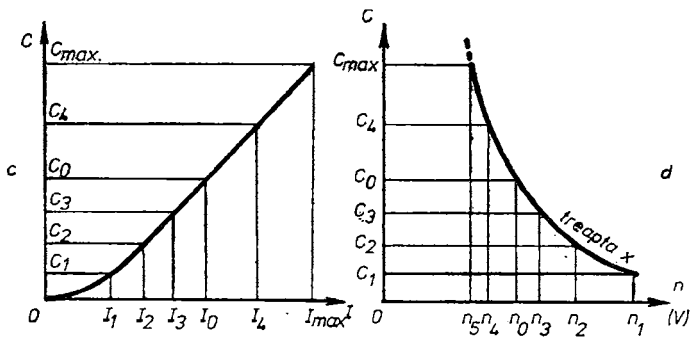



*Fig. 6.29.* Caracteristicile motorului serie de curent ondulat : *a* — caracteristica tensiunii $U(I)$ pentru diverse trepte ale graduatorului (reglaj discontinuu) ; *b* — caracteristica de mers în gol $E(I)$ ; *c* — caracteristica cuplului $C(I)$ ; *d* — caracteristica mecanică $C(n)$.




Caracteristica de mers în gol a motorului $E(I)_{n0}$ pentru o turație de referință $n_0$ este cunoscută și furnizată de constructor. Familia de caracteristici $E(I)$ având ca parametru turația $n$ se deduce ușor din $E(I)_{n0}$ întrucît f.e.m. este proporțională cu $n$ și deci, pentru același $I$, rezultă :

$$\frac{E(I)_{n1}}{E(I)_{n0}} = \frac{n_1}{n_0}.$$

Cu acest procedeu se trasează caracteristicile $E(I)_n$ ca în figura 6.29, *b* peste care s-au suprapus și caracteristicile $E(I)$.

Intersecțiile $E(I)_n$ cu $E(I)_x$ determină tot atîtea puncte de funcționare ($P_0$, $P_1$ ...) de unde rezultă curenții ($I_0$, $I_1$ ...), evident cu limitarea $I_{max}$ suportat de motor (valoare cunoscută — de regulă $I_{demaraj}$). Deci, pentru o aceeași treaptă (poz. graduator) se determină :

— turațiile $n_1$, $n_2$, $n_3$... la care corespund curenții $I_1$, $I_2$, $I_3$... (fig. 6.29, *b*

— cuplurile $C_1$, $C_2$, $C_3$ ... care corespund la aceiași curenți $I_1$, $I_2$, $I_3$ ... (fig. 6.29, *c*).

Prin eliminarea grafică a lui $I$ (între diagramele 6.29, *b* și 6.29, *c*) se ajunge, prin puncte, la construcția caracteristicii $C(n)$ și de la ea la caracteristica de tracțiune $F(V)$ pentru treapta respectivă (fig. 6.29, *c*).

Pentru trecerea de la $C(n)$ la $F(V)$ se folosesc relațiile de trecere (ca la locomotiva de curent continuu) :

$$F = \eta_T \frac{u}{R} C \times N;$$

$$V = \frac{2\pi\ R.60}{1000\ \eta_T} \cdot n,$$

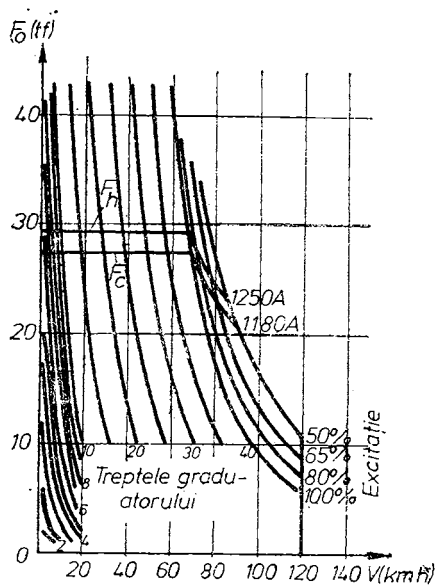



*Fig. 6.30.* Caracteristica de tracțiune a locomotivei 060—EA(CFR).

$\eta_T$ este raportul de transmitere al angrenajului (0,975) ;

$R$ — raza roții de rulare (cu bandajul semiuzat), în m ;

$C$ — cuplul la arborele motorului (kgf.m).

Utilizînd caracteristicile $n(I)$ și $C(I)$ la cîmp redus (furnizate de constructor) se deduc din ele $F(V)$ la cîmp redus. Treptele de cîmp redus se aplică numai la ultima treaptă (ultimul cran) pentru care rezultă $U_{nominal}$ a motorului.

Pentru exemplificare, în figura 6.30 este prezentată caracteristica de tracțiune $F(V)$ a LE-060-EA (CFR). Pe aceeași diagramă s-au trasat și forța de tracțiune uniorară ($F_h$), și forța de tracțiune de regim continuu ($F_c$).

# Capitolul 7

# PARTEA MECANICĂ A LOCOMOTIVELOR ELECTRICE

## 7.1. GENERALITĂȚI

Din punct de vedere mecanic, o locomotivă electrică, de altminteri, ca oricare alt tip de vehicul motor feroviar, datorită motorului de tracțiune poate dezvolta o forță motoare la obadă utilizînd (proprietate comună tuturor vehiculelor motoare) aderența roții pe șină.

Structura și subansamblele constituente ale părții mecanice ca și formulele de osii uzuale ale unei locomotive electrice au fost arătate la cap. 1 (vezi fig. 1.15, fig. 1.16).

Problemele ce trebuie rezolvate în legătură cu partea mecanică sînt foarte numeroase: aparatul de rulare, construcția boghiurilor și a cutiei, suspensia, aparatele de tracțiune și ciocnire, dinamica și stabilitatea, frîna mecanică, suspensia motoarelor și acționarea osiilor. Aceste numeroase probleme nu sînt specifice locomotivelor electrice, ci în marea lor majoritate se pun în același mod și la locomotivele diesel, la locomotivele cu abur sau la vagoane. Pentru acest considerent, în capitolul de față se tratează numai unele dintre problemele părții mecanice, care prezintă anumite particularități la locomotivele electrice.

Tendințele actuale în construcția părții mecanice a locomotivelor electrice (fig. 1.16) sînt justificate pe considerentele expuse mai jos.

O locomotivă electrică poate fi construită numai cu osii motoare sau cu osii motoare și cu osii purtătoare; greutatea care revine acestora din urmă reprezintă o parte din greutatea locomotivei neutilizată pentru aderență.

Osiile purtătoare au fost folosite în construcția locomotivelor electrice în următoarele împrejurări:

— cînd greutatea totală a locomotivei, repartizată numai pe osiile motoare, depășea sarcina maximă admisă pe osii;

— cînd locomotiva era de mare viteză, considerîndu-se necesară instalarea la extremitățile locomotivei a cîte unei osii alergătoare (bisel) sau a unui boghiu alergător cu două osii, avînd un rol de ghidaj; este cazul locomotivelor rapide cu formula osiilor 1-$D_0$-1; 2-$D_0$-2.

Adoptarea osiilor alegătoare pentru primul considerent a fost justificată atîta vreme cît nu s-au putut construi motoare de tracțiune puternice și ușoare, în cazul locomotivelor puternice pentru producerea puterii cerute de osiile motoare rezultînd o greutate totală mare. În stadiul actual al con-

structiei de motoare de tracțiune, puteri de ordinul 600...700 kW pentru locomotivele de curent continuu și 900...1200 kW pentru locomotivele de curent monofazat sînt uzuale.

De asemenea astăzi se consideră rezolvată și problema realizării de locomotive cu boghiuri motoare cu două sau cu trei osii motoare cu o comportare dintre cele mai bune atît la trecerea prin curbe, cît și la regimul marilor viteze (recordul de viteză de 331 km/h, realizat la încercările efectuate în Franța, în 28.—29.III.1955, a fost obținut cu locomotive de tipul $B_0—B_0$ și $C_0—C_0$).

Datorită progresului tehnic în direcțiile menționate, astăzi construcția de locomotive electrice cu boghiuri motoare cu aderență totală este o soluție generalizată.

În ipoteza că o locomotivă are toate osiile motoare, determinarea numărului acestora ($N_0$) se poate face folosind relația simplă:

$$N_0 = \frac{G_a}{G_0},$$

în care:

$G_a$ este greutatea totală aderentă a locomotivei, care se determină din condițiile de remorcare (tonajul de remorcat pe profilul dat, adică $F_{0\,max} = G_a \cdot \varphi_a$);

$G_0$ — sarcina admisă pe osie și care este dictată de tipul de șină, de suprastructura căii și de lucrările de artă din cuprinsul secției de remorcare respective (pe liniile magistrale C.F.R. care intră în considerare la electrificare, $G_0 = 20 \ldots 21$ t/osie).

## 7.2. ACȚIONAREA OSIILOR MOTOARE

La primele construcții de locomotive electrice, sub influența locomotivelor cu abur, s-a adoptat acționarea prin biele a osiilor motoare — acționare de grup — la care un singur motor acționa mai multe osii cuplate prin biele. Acest mod de acționare prezintă un singur avantaj, acela legat de o mai bună utilizare a greutății aderente a locomotivei. În schimb, bielele dau loc la o serie de mișcări perturbatorii, solicită defavorabil calea de rulare ocazionînd cheltuieli de întreținere sporite și, de asemenea, produc solicitări defavorabile însăși asupra locomotivei. Datorită acestor dezavantaje, acționarea osiilor motoare prin biele a fost practic abandonată în construcțiile actuale.

Ea a fost înlocuită cu acționarea individuală, la care fiecare osie este antrenată de către un electromotor, soluție aproape generalizată actualmente. Acționarea individuală înlătură dezavantajele menționate la acționarea prin biele și aduce în plus avantajul că în ipoteza avarierii unui electromotor de tracțiune, acesta se poate izola, locomotiva continuîndu-și parcursul cu celelalte motoare. În cazul special al locomotivelor de curent continuu, existența mai multor motoare este dictată și de necesitatea de a efectua diverse cuplări între electromotoare (serie, serie-paralel, paralel) pentru a obține o gamă cît mai largă de viteze economice.

7.2.1. **Descărcarea osiilor datorită efectului cuplului de cabraj.** Acționarea individuală a osiilor la un vehicul motor prezintă neajunsul că sub efectul forței de tracțiune se produce o descărcare a osiilor (reducere a greutății aderente), datorită așa-numitului cuplu de cabraj.

În regim de tracțiune, o locomotivă este supusă la două forțe orizontale (fig. 7.1) :

— forța de tracțiune (rezistentă) $T$, aplicată la cîrlig ;

— forța de tracțiune la obadă $F_0$ ; pentru fiecare osie motoare revine $\frac{F_0}{n}$, $n$ fiind numărul osiilor motoare.

Aceste două forțe orizontale și de sens contrar, situate la distanța $H$ (înălțimea cîrligului față de nivelul superior al șinei), produc cuplul de cabraj, care tinde să descarce partea din față a locomotivei și să încarce partea din spate, adică în final unele osii motoare dispun de forță de aderență mai redusă.

Pentru evidențierea acestui fenomen se va examina cazul unei locomotive $B_0-B_0$ cu boghiuri libere, ca în figura 7.1 unde fiecare boghiu antrenează cutia printr-un pivot (modul de transmitere al forței de tracțiune la cîrlig).

În stare de repaus, sarcina pe osie va fi $\frac{G_a}{4}$, $G_a$ fiind greutatea totală și aderentă a locomotivei.

În regim de tracțiune, datorită apariției cuplului de cabraj, sarcinile pe osii își modifică valoarea la $G_1$, $G_2$, $G_3$ , $G_4$ apărînd diferențele :

$$\Delta G_1 = \frac{G_a}{4} - G_1 ; \quad \Delta G_2 = \frac{G_a}{4} - G_2 ; \quad G_3 = \frac{G_a}{4} - G_3 ; \quad \Delta G_4 = \frac{G_a}{4} - G_4 .$$

Valorile pozitive pentru $\Delta G$ vor indica osiile descărcate, iar valorile negative — osiile supraîncărcate.

În mod special interesează diferența $\Delta G_1$ ( respectiv diferența relativă $\frac{\Delta G_1}{G_a/4}$ ) pentru prima osie, care este cea mai descărcată.

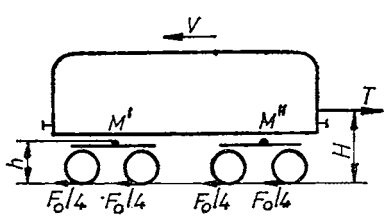



*Fig. 7.1.* Producerea cuplului de cabraj la o locomotivă cu acționarea individuală a osiilor.

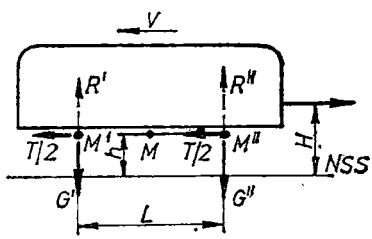



*Fig. 7.2.* Cabrajul cutiei.

Pentru analiza calitativă a cabrajului, în cele de mai jos se adoptă o metodă de tratare simplificată, adică se consideră separat cabrajul cutiei și boghiului și se suprapun efectele.

Cutia locomotivei (fig. 7.2) se găsește în echilibru sub influența următoarelor forțe:

— forțele motoare $T/2$ aplicate la pivoturile de antrenare în punctele $M'$ și $M''$;

— forța de tracțiune $T$, aplicată la cîrlig;

— sarcinile $G'$, $G''$ ale cutiei pe pivoturi (echilibrate de reacțiile verticale $R'$, $R''$).

Cutia este supusă la două cupluri, care trebuie să se echilibreze:

— un cuplu datorat faptului că forța de la cîrlig și forțele motoare aplicate la pivoturi nu sînt la aceeași înălțime;

— un cuplu datorat faptului că greutatea cutiei $G_c$, în regim de tracțiune, se repartizează inegal la cele două reazeme ($R'' < R'$).

Scriind momentele în raport cu punctul $M$(mijlocul distanței $L$ dintre pivoturi) se obține:

$$T\,(H - h) = (G'' - G')\,\frac{L}{2}. \tag{1}$$

În stare de repaus, greutatea cutiei se repartizează egal la cele două pivoturi și deci:

$$G'' = G' = \frac{G_c}{2}.$$

În regim de tracțiune:

$$G' = \frac{G_c}{2} - \Delta C, \quad G'' = \frac{G_c}{2} + \Delta C,$$

de unde rezultă:

$$\Delta C = \frac{G'' - G'}{2}.$$

Ținînd seamă de vloarea lui $\frac{G'' - G'}{2}$ din relația (1) se obține:

$$\Delta C = \frac{G'' - G'}{2} = T \cdot \frac{H - h}{L}. \tag{2}$$

Considerînd boghiul din față cu greutatea $G_B$ și încărcat de cutie cu sarcina $G'$, în regim de tracțiune pe cele două osii ale sale vor apărea sarcinile $G_1$ și $G_2$ (fig. 7.3).

Scriind egalitatea momentelor în raport cu punctul $I$ (mijlocul ampatamentului boghiului 1), se obține:

$$\frac{T}{2} \cdot h = (G_2 - G_1)\frac{l}{2}. \qquad (3)$$

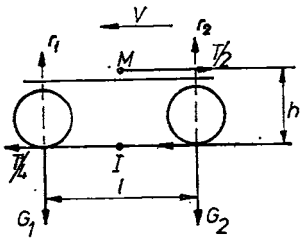



*Fig. 7.3.* Cabrajul boghiului.

În starea de repaus a locomotivei:

$$G_1 = G_2 = \frac{G_B + G'}{2}.$$

În regim de tracțiune:

$$G_1 = \frac{G_B + G'}{2} - \Delta B;$$

$$G_2 = \frac{G_B + G'}{2} + \Delta B. \qquad (4)$$

Din relațiile (3) și (4) rezultă:

$$\Delta B = \frac{G_2 - G_1}{2} = \frac{T}{2} \cdot \frac{h}{1}. \qquad (5)$$

Cumulînd efectul cuplului de cabraj al cutiei și al boghiului se obțin descărcările osiilor:

$$\Delta G_1 = \frac{\Delta C}{2} + \Delta B, \qquad \Delta G_3 = -\frac{\Delta C}{2} + \Delta B;$$

$$\Delta G_2 = \frac{\Delta C}{2} - \Delta B, \qquad \Delta G_4 = -\frac{\Delta C}{2} - \Delta B.$$

Ținînd seamă de expresia lui $\Delta C$ din relația (2) și de expresia lui $\Delta B$ din relația (5), pentru prima osie, care este cea mai descărcată, rezultă descărcarea:

$$\Delta G_1 = \frac{\Delta C}{2} + \Delta B = \frac{T}{2}\left(\frac{H - h}{L} + \frac{h}{l}\right) \qquad (6)$$

sau descărcarea relativă:

$$\frac{\Delta G_1}{G_a/4} = 2\frac{T}{G_a}\left[\frac{H}{L} + h\left(\frac{1}{l} - \frac{1}{L}\right)\right]. \qquad (7)$$

La stabilirea acestor relații s-a considerat întreg boghiul ca un ansamblu rigid; în realitate el are o parte nesuspendată (osiile) și cadrul care este suspendat elastic pe osii.

De asemenea, nu s-a luat în considerare legătura electromotor-osie cu diversele moduri de suspensie a motorului și a transmisiei cu roți dințate pentru antrenarea osiei.

Dacă s-ar ține seamă și de aceste elemente, se poate conta că oricare ar fi sistemul de suspensie a motorului și de antrenare a osiei, acesta introduce o variație de sarcină la osii de valoare $\pm\frac{T}{4}\cdot\frac{D_0}{l}$ ($D_0$ — diametrul roții motoare). Apoi, cînd se consideră cadrul boghiului separat, acesta introduce o variație de sarcini la osii de valoare $\mp\frac{T}{4}\cdot\frac{D_0}{l}$, care anulează pe precedenta.

De asemenea, cînd s-a considerat forța motoare la pivoturi $\frac{T}{2}$, s-a neglijat forța rezistentă absorbită de fiecare boghiu, care este aplicată la înălțimea centrului lor de greutate. Eroarea care rezultă este fără însemnătate, întrucît efortul rezistent al boghiului este foarte mic în raport cu forța totală de tracțiune la cîrlig $T$.

În concluzie, relațiile stabilite pentru descărcarea osiilor nu prezintă erori cu însemnătate practică.

Relațiile (6) și (7) permit analiza calitativă a utilizării greutății aderente a locomotivei.

În relația (6) sînt puși în evidență cei doi termeni care corespund cabrajului cutiei și respectiv cabrajului boghiului.

Cabrajul cutiei $\frac{H-h}{L}$ apare datorită faptului că efortul rezistent suportat de cutie $T$ este aplicat mai sus decît efortul de tracțiune transmis prin boghiuri $T/2$.

Cabrajul boghiului $\frac{h}{l}$ se datorește faptului că efortul de tracțiune transmis cutiei $T/2$ se exercită în punctul $M'$, mai sus decît planul de rulare.

Din relația care definește cabrajul cutiei, se observă că, pe măsura creșterii lui $h$, cabrajul cutiei scade, în schimb crește cabrajul boghiului. Tendința constructivă este totuși de a reduce pe $h$ (diminuarea cabrajului boghiului, cu toate că va crește cabrajul cutiei), întrucît cabrajul boghiului scade mult mai repede decît crește cabrajul cutiei ($l$ este mai mic decît $L$).

Diminuarea cuplurilor de cabraj, ceea ce conduc la ameliorarea utilizării greutății aderente, se obține prin:

— diminuarea lui $H$, adică coborîrea punctului de aplicație al cîrligului de tracțiune cît mai jos;

— mărirea distanței $L$, adică a distanței dintre pivoții boghiurilor;

— mărirea distanței $l$, adică a ampatamentului boghiului;

— micșorarea distanței $h$, adică coborîrea cît mai aproape de șină a punctelor de antrenare a pivoturilor prin care boghiurile antrenează la rîndul lor cutia. Această ultimă măsură ($h$ mic), care se aplică la construcțiile

recente, este cunoscută sub denumirea de realizare a locomotivelor cu „tracțiune joasă".

La locomotivele cu pivoți și crapodine, de regulă $h = 0{,}7H$ și ele sînt considerate cu tracțiune înaltă.

Factorul $\frac{T}{G_a}$ arată că la demaraj, cînd $T$ este maxim, descărcarea osiilor este maximă, lucru nefavorabil, întrucît tocmai în această situație este nevoie de a utiliza integral aderența.

Constructorii aleg distanțele menționate la limitele optime, întrucît mărirea lui $L$ și $l$ peste anumite valori va defavoriza înscrierea în curbă a locomotivei; $H$ este dictat de diametrul roților și de înălțimea cadrului boghiului; $h$ se poate coborî pînă la nivelul osiilor motoare și chiar pînă la nivelul șinei.

Pentru a scoate în evidență influența alegerii judicioase a parametrilor constructivi ai unei locomotive asupra utilizării greutății aderente, considerăm ca exemplu cazul unei locomotive electrice existente de tip $B_0—B_0$ cu boghiuri libere avînd următorii parametri:

— distanța dintre pivoți $L = 6\,000$ mm; ampatamentul boghiului $l = 2\,950$ mm; înălțimea cîrligului $H = 1\,100$ mm; înălțimea pivoților $h = 780$ mm.

Conform relației (7), descărcarea primei osii va fi:

$$\frac{\frac{G_1}{G_a}}{4} = 2\frac{T}{G_a}\left[\frac{1\,000}{6\,000} + 780\left(\frac{1}{2\,950} - \frac{1}{6\,000}\right)\right] = 0{,}634 \cdot \frac{T}{G_a} = 0{,}634\varphi.$$

Raportul $\frac{T}{G_a} = \varphi$ reprezintă coeficientul de aderență.

La demaraj admițînd $\varphi = 0{,}333$, iar la locomotivă o sarcină statică pe osie de 20 t, rezultă descărcarea primei osii:

$$\Delta G_1 = 0{,}634 \cdot 0{,}333 \cdot 20 = 4{,}2 \text{ t}.$$

În regim de tracțiune, pentru $\varphi = 0{,}2$, rezultă descărcarea primei osii:

$$\Delta G_1' = 0{,}634 \cdot 0{,}2 \cdot 20 = 2{,}53 \text{ t}.$$

Pentru aceeași locomotivă, dacă ar fi construită cu „tracțiune joasă", după principiul indicat în figura 7.7 ($h = 0$), ar rezulta:

$$\frac{\frac{\Delta G_1}{G_a}}{4} = 2 \cdot \frac{G}{T_a} \cdot \frac{1\,100}{6\,000} = 0{,}366\,\varphi.$$

La demaraj, pentru $\varphi = 0{,}333$, rezultă descărcarea osiei 2,44 t, adică aproape jumătate față de cazul precedent.

În regim de tracțiune, pentru $\varphi = 0{,}2$, rezultă descărcarea osiei de 1,46 t, față de 2,53 t în cazul precedent.

### 7.2.2. Soluții constructive adoptate pentru diminuarea cabrajului.

În construcția locomotivelor au fost adoptate o varietate de soluții care au drept

scop diminuarea fenomenului de cabraj. În cele de mai jos se prezintă cîteva idei de principiu care stau la baza soluțiilor folosite.

*a. Articulații între boghiuri.* Între cele două boghiuri ale locomotivei se folosește o articulație realizată dintr-un ansamblu prelungitor-șapă ca în figura 7.4.

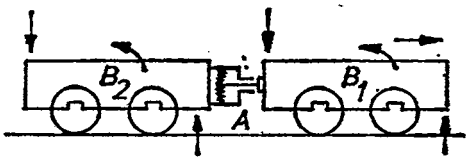



*Fig. 7.4.* Boghiuri articulate.

Dispoziția schematică a articulației ($A$) este reprezentată în figura 7.5. Între prelungitor și pereții șapei se lasă un joc care este controlat de două arcuri. Cînd partea din spate a boghiului *1* se lasă, partea din față a boghiului *2* tinde să se ridice. Articulația cu cele două arcuri menține cele două boghiuri în același plan paralel cu calea.

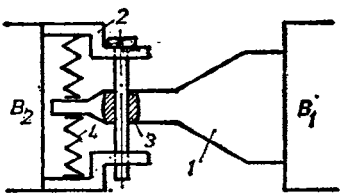



*Fig. 7.5.* Dispoziția schematică a articulației dintre boghiuri: *1* — prelungitor: *2* — șapă; *3* — articulație sferică; *4* — arcuri de rapel.

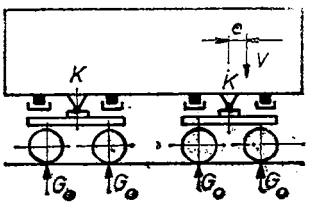



*Fig. 7.6.* Principiul compensatoarelor hidraulice: $K$ — pivot/crapodină; $c$ — compensator hidraulic (cilindru cu piston).

*b. Utilizarea compensatoarelor.* S-au imaginat cilindri cu aer comprimat sau hidraulici, plasați între șasiul cutiei și cadrul boghiurilor. Soluția nu a dat rezultate practice satisfăcătoare, întrucît apar dificultăți în ceea ce privește sincronizarea acțiunii de anticabraj (apăsarea boghiurilor de către pistoanele cilindrilor compensatoarelor), cu momentul manifestării cabrajului.

Principiul unei astfel de soluții este redat în figura 7.6.

Presiunea compensatorului pe cadrul boghiului, care este dată de presiunea uleiului introdus în cilindru, trebuie să varieze în funcție de valoarea forței de tracțiune (se parametrează curentul din motoarele de tracțiune și în funcție de valoarea lui se comandă supapa care permite accesul uleiului spre compensator).

Cînd compensatorul lucrează, el apare ca un suport auxiliar, ceea ce conduce la deplasarea sarcinii verticale $V$, transmise boghiului, din pivot într-o poziție situată la distanța $e$ și în final la egalarea sarcinilor pe osii.

*c. Tracțiunea joasă.* Soluția constă în a aplica forța de tracțiune, adică punctul de antrenare a cutiei de către boghiurile motoare, cît mai jos.

O soluție constructivă pentru realizarea tracțiunii joase este redată în figura 7.7.

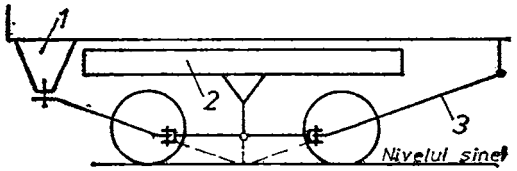



*Fig. 7.7.* Schema tracțiunii joase, prin bare: *1* — șasiul cutiei; *2* — cadrul boghiului; *3* — bare de tracțiune.

Pentru transmiterea forței de tracțiune nu se utilizează un pivot, ci niște bare longitudinale plasate sub boghiu. Barele longitudinale se dispun constructiv, astfel încît se poate realiza $h = 0$.

Dintre soluțiile propuse pentru diminuarea cuplului de cabraj, actualmente constructorii se orientează către realizarea tracțiunii joase. Construcțiile recente de locomotive electrice din Franța, Elveția, Suedia, Cehoslovacia, R. S. România sînt realizate pe principiul tracțiunii joase. Așa cum se poate observa și din exemplul numeric, cu asemenea soluții descărcarea cea mai pronunțată a osiilor la demaraj nu atinge decît cîteva procente din sarcina statică pe osie, ceea ce în mod practic nu reprezintă un inconvenient prea serios, dovadă fiind faptul că astăzi locomotivele electrice se construiesc în marea lor majoritate cu acționare individuală a osiilor.

## 7.3. SUSPENSIA MOTOARELOR DE TRACȚIUNE ȘI TRANSMITEREA CUPLULUI MOTOR

7.3.1. **Variante constructive.** O problemă importantă în rezolvarea părții mecanice a unei locomotive este aceea de așezare (suspensie) a motoarelor de tracțiune și, strîns legată de aceasta, problema modului cum se poate transmite cuplul de la arborele motorului la osia motoare (acționarea osiei motoare).

În funcție de modul cum pot fi așezate motoarele de tracțiune pe locomotivă, sînt posibile următoarele soluții:

— motor nesuspendat, cînd motorul se sprijină cu toată greutatea sa pe partea nesuspendată a locomotivei, adică pe osia motoare;

— motor semisuspendat, cînd o parte din greutatea motorului apasă pe osia motoare, iar restul din greutate revine părții suspendate a locomotivei (cadrul boghiului, în cazul locomotivelor pe boghiuri sau șasiul cutiei, în cazul locomotivelor cu șasiu unic);

— motor complet suspendat, cînd motorul de tracțiune se sprijină integral pe partea suspendată a locomotivei.

Aceste variante constructive sînt schițate în figura 7.8.

Motorul nesuspendat (fig. 7.8, *a*) are rotorul calat pe osie, iar statorul fixat într-un mod oarecare de cadrul boghiului. Cuplul se transmite direct și fără pierderi nefiind necesară vreo instalație intermediară între arborele motorului și osie. Cu toate că această soluție pare cea mai simplă din punct de vedere constructiv, ea prezintă serioase dezavantaje ca:

— greutatea motorului (rotorului) încarcă osia;

— trepidațiile și șocurile provenind de la cale conduc la o oboseală rapidă a părților motorului ce fac corp comun cu osia;

— întrefierul motorului trebuie să fie mare (de ordinul 40—50 mm) pentru a putea prelua jocurile dintre osie și boghiu, ceea ce conduce la o pierdere de putere foarte mare;

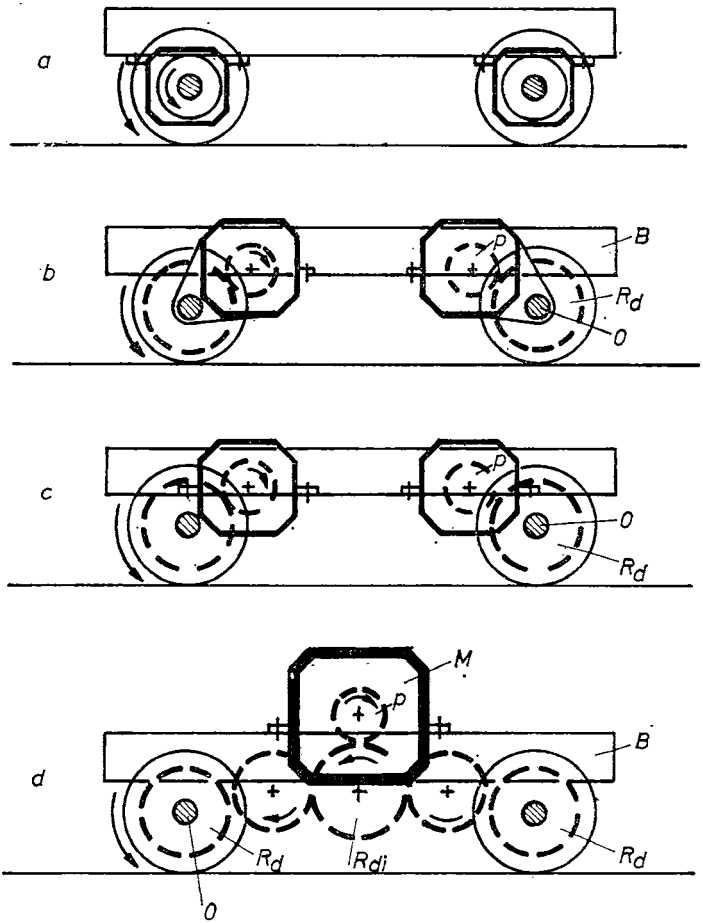



*Fig. 7.8.* Variante de amplasare a motorului de tracțiune pe vehicul: *a* — motor nesuspendat; *b* — motor semisuspendat; *c* — — motor suspendat cu acționare individuală a osiilor; *d* — motor suspendat cu acționare în grup a osiilor prin angrenaje (boghiu monomotor).

— demontarea motorului pentru revizii necesită depresarea roții motoare, rotorului ..., ceea ce conduce la dificultăți în exploatare;

— la vitezele actuale de exploatare, puterea motorului nu poate fi utilizată. Din considerente de putere, gabarit și utilizare economică a materialelor active din motor (cupru, tole ...) viteza periferică a rotorului trebuie să se situeze peste 50 m/s. Constructiv $\Phi_{rotor} \leqslant 0{,}7\ \Phi_{roată}$ ca să se poată instala motorul; admițînd viteza periferică a rotorului 50 m/s rezultă viteza

locomotivei $V = \frac{50}{0,7} = 71$ m/s $= 266$ km/h la care motorul ar fi bine utilizat. Acest lucru conduce la a utiliza motor de turație redusă adică cu gabarit și greutate mare ceea ce complică și mai mult lucrurile. Datorită acestor neajunsuri, motorul axial nesuspendat a fost abandonat în practică. Necesitatea folosirii motoarelor de putere din ce în ce mai mare, de greutate cît mai redusă și gabarit de asemenea, lucru ce se obține prin sporirea turației motorului, a impus folosirea unui angrenaj între arborele motorului și osia motoare. Deși această instalație suplimentară complică din punct de vedere constructiv totuși oferă avantajul de a folosi un același motor de tracțiune (de construcție economică) pentru realizarea diverselor tipuri de locomotivă (marfă, călători ...), numai prin schimbarea raportului de transmitere a angrenajului. Pentru aceste considerente acționarea osiei la locomotivele electrice se face exclusiv prin intermediul unui angrenaj, denumit în mod curent și „transmisie".

7.3.2. **Motorul semisuspendat.** În mod curent, prin motor semisuspendat se înțelege soluția prezentată schematic în figura 7.9 și 7.10.

Motorul semisuspendat se sprijină în trei puncte: în două puncte direct pe osie prin intermediul palierelor, iar în al treilea punct este legat elastic de cadrul boghiului (partea suspendată a locomotivei).

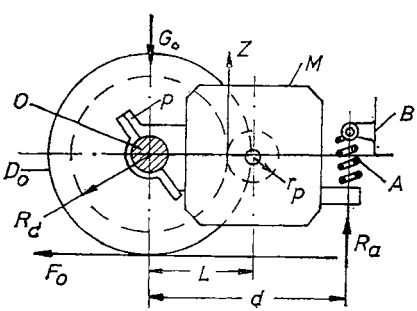



*Fig. 7.9.* Schema motorului semisuspendat (secțiune transversală): *0* — osia; *Rd*$^r$*p* — angrenajul; $D_0$ — roata motoare; *M* — motor; *p* — paliere de osie.

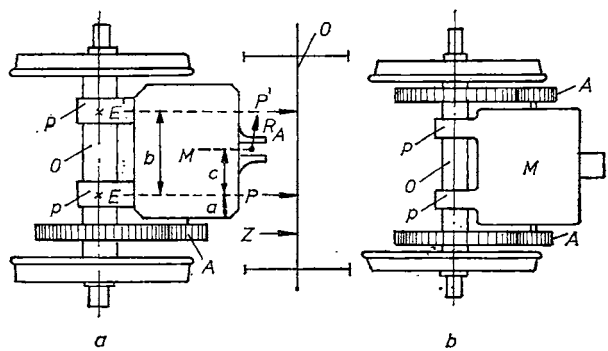



*Fig. 7.10.* Schema motorului semisuspendat (vedere schematică în plan): *a* — transmisie unilaterală; *b* — transmisie bilaterală.

Axul motorului nu mai coincide cu axul osiei, deci motorul nu mai este axial.

Acest mod de suspensie, fiind aplicat în foarte largă măsură la tramvaie, este denumit și „suspensie tip tramvai"; din cauza formei celor două paliere de osie mai este denumit „suspensie cu gheare", iar din cauza formei consolei de care se suspendă motorul de cadru — „suspensie-nas".

Transmiterea cuplului de la arborele motorului la osie se face printr-o transmisie cu roți dințate, care se realizează prin calarea unei roți dințate pe osie și a unui pinion în capul arborelui motorului. De asemenea, axul motorului și axa osiei trebuie să fie dispuse astfel ca să-și mențină o poziție para-

lelă, lucru ce se realizează prin cele două paliere de prindere pe osie (distanță invariabilă).

Transmisia poate fi unilaterală (fig. 7.10, *a*) sau bilaterală (fig. 7.10, *b*).

Transmisia unilaterală prezintă avantajul de a oferi un spațiu mai mare între roți, deci posibilități de a monta un electromotor cu gabarit sporit, în schimb are dezavantajul de a solicita neuniform cele două paliere de sprijin al motorului pe osie și angrenajul.

Transmisia bilaterală are avantajul unei solicitări uniforme a celor două paliere de osie și limitează oboseala angrenajelor cînd cuplul transmis are valoare mare, în schimb micșorează gabaritul disponibil pentru instalarea motorului.

Datorită progresului tehnic actual în fabricarea angrenajelor (mărirea rezistenței mecanice și mărirea rezistenței la uzură) utilizarea transmisiei unilaterale este aproape generalizată.

*a*) *Elemente privind geometria angrenajului.* Poziționarea motorului față de osie este determinată de distanța dintre axele osiei și motorului (cota $L$ — denumită și antrax — fig. 7.9), care în cazul cînd cele două axe sînt pe aceeași orizontală este determinată de relația:

$$L = R_d + r_p. \tag{1}$$

Atît diametrul cercului primitiv al roții mari dințate ($2R_d$), cît și cel al pinionului ($2r_p$) au anumite limitări. Așa spre exemplu după calculul angrenajului și stabilirea numărului de dinți și a dimensiunilor geometrice, obligatoriu se face verificarea înscrierii în gabarit a angrenajului, de unde rezultă limita lui $R_d$ (fig. 7.11).

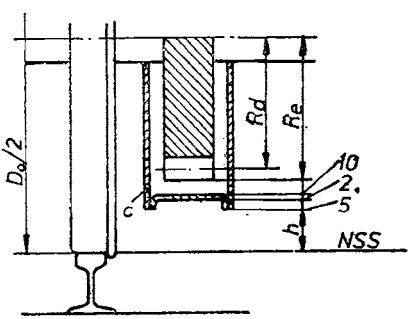



*Fig. 7.11.* Verificarea înscrierii în gabarit a angrenajului.

Angrenajul se închide ermetic într-o carcasă (*c*) denumită și tobă în care angrenajul lucrează în ulei; cotele menționate pe figură sînt constructive (2 mm grosimea tablei, 5 mm bordura pentru sudură, 10 mm la fundul angrenajului pentru buna circulație a uleiului). Distanța minimă $h$, denumită garda la sol, se socotește pentru roata motoare considerată cu bandajul uzat la maximum și este reglementată prin STAS 4392-75 (gabarit de construcție pentru material rulant de cale ferată). Garda la sol se ia $h = 80$ mm pentru cazurile cînd angrenajul este nesuspendat (fixat pe osie) adică gabaritul static, iar cînd angrenajul este suspendat (fixat pe boghiu) cota „$h$" se va respecta față de gabaritul cinematic (se adaugă oscilația maximă pe verticală a locomotivei, de ordinul 40—50 mm).

Limitarea diametrului cercului primitiv al pinionului ($2r_p$) este impusă pe de o parte de numărul de dinți minim ($Z_2$) recomandat pentru angrenajele cilindrice de locomotive ($Z_{2min} \geqslant 20$), sau de grosimea cărnii pinionului ($b$ — distanța de la baza dintelui la circumferința diametrului găurii), mărime ce nu poate fi luată sub o anume valoare pentru a asigura nedeformarea

pinionului la fretare pe arborele motorului. De regulă această limitare se exprimă prin:

$$b = (3 \ldots 4)\ m, \text{ sau } \frac{2\, r_p}{d_0} = 1{,}6 \ldots 1{,}8$$

$m$ este modulul danturii; $d_0$ — diametrul găurii de fretare.

Raportul de transmitere al angrenajului este definit prin relația:

$$u = \frac{R_d}{r_p} = \frac{Z_1}{Z_2}; \tag{2}$$

($Z_1$, $Z_2$ — numărul de dinți ai roții mari dințate, respectiv ai pinionului) și se observă că el influențează dimensiunile geometrice ale angrenajului (prin $R_d$, $r_p$), precum și antraxul (prin $Z_1$, $Z_2$).

Relația (1) se mai poate scrie:

$$L = \frac{mz_1 + mz_2}{2} = m\frac{z_t}{2}; \tag{3}$$

$m$ este modulul danturii,

de unde rezultă că redistribuind numărul de dinți între pinion și roata dințată, operație ce se face cu ocazia corijării danturii (cu menținerea condiției $z_t$ = const.) și a definitivării lui $u$, antraxul nu se schimbă.

În practică se pot ivi diverse situații care se tratează de la caz la caz:

— Locomotivele de mare viteză (acestea de regulă necesită $u_{min}$) folosesc motoare puternice a căror turație nominală este de ordinul 1000 — 1200 rot/min. Raportul real $u$ se realizează de cele mai multe ori prin redistribuirea $z_1$ și $z_2$ (se micșorează treptat $z_1$ și se mărește $z_2$) astfel ca $z_t = z_1 + z_2$ = const., pînă se obține $u$ la turația convenabilă motorului.

— La motoarele de putere mică unde turația nominală, de regulă, este mare 1700 ... 1800 rot/min realizarea unui $u_{mare}$ (cazul locomotivelor de marfă cu viteză constructivă redusă) prezintă dificultăți și de multe ori turația nominală a motorului se limitează artificial la valori mai reduse.

— Cînd motorul de tracțiune este deja construit (acesta este în general cazul practic) și deci turația lui nominală ($n$) este cunoscută se efectuează un calcul de verificare a acesteia ($n$) față de turația maximă ($n'$) rezultată pentru $u_{max}$ și $V_{max}$ (viteza max. constructivă a locomotivei), adică:

$$n' = \frac{60\, V_{max}\, u_{max}}{3{,}6\, D}. \tag{4}$$

Condiția obligatorie este $n' > n$; $n'$ se compară și cu turația maximă admisă de motor (aceasta se indică de constructorul motorului).

— Dacă din geometria angrenajului tratată ca mai sus apar probleme cu realizarea antraxului, atunci acesta se potrivește prin proiect prin supra-

înălțarea motorului (se deplasează pe verticală axul motorului — cota $h_m$) și se practică și o scobitură (cota $e$) în carcasa motorului în care intră ansamblul osie-palier (fig. 7.12). În cazul supraînălțării motorului (fig. 7.12, *b*) antraxul devine $L_1 = \sqrt{A^2 - h_m^2}$.

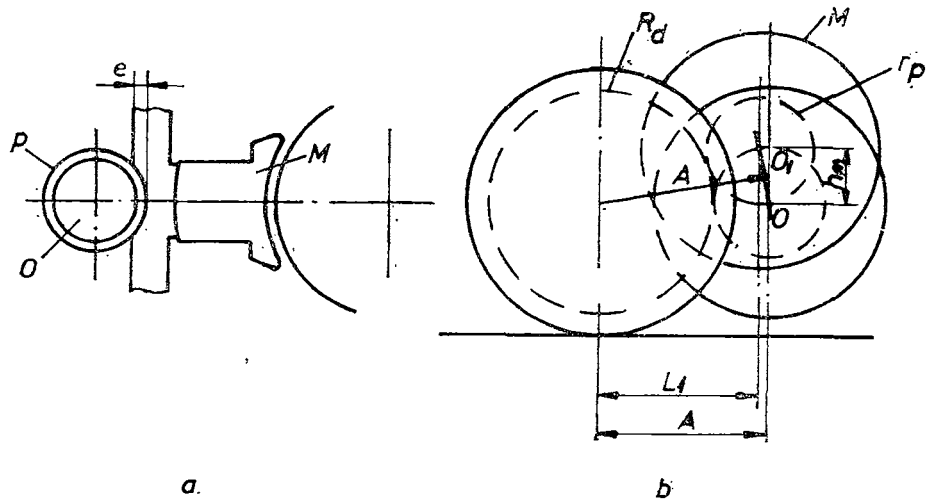



*Fig. 7.12.* Soluții pentru realizarea antraxului: *a* — scobirea carcasei motorului; *b* — supraînălțarea motorului.

*b*) *Legătura elastică dintre nasul motorului și cadrul boghiului.* Legătura elastică dintre motor și partea suspendată a locomotivei se rezolvă fie prin arcuri (fig. 7.13) fie prin silent-bloc de cauciuc (fig. 7.14).

Silent-blocul este realizat ca o coroană elastică din cauciuc ce se fixează pe cadrul boghiului și în care se angajează nasul motorului sau coroana elastică se poate fixa pe motor, iar nasul este fixat pe cadrul boghiului (în figura 7.14 este reprezentat principiul ultimei variante).

*c*) *Angrenaj elastic.* În timpul circulației locomotivei și mai ales la trecerea peste neregularitățile căii, osia, împreună cu roata mare dințată fixată pe ea, capătă o deplasare verticală față de masa suspendată, făcînd ca motorul să oscileze în jurul punctului de suspensie de pe osie (lagăre). Buna funcționare a transmisiei nu este însă împiedicată, deoarece motorul-fiind legat de osie — distanța dintre roata mare dințată și pinion rămîne invariabilă. În schimb, oscilațiile maselor suspendate produc deplasări liniare sau de accelerare asupra masei indusului, adică o solicitare dinamică suplimentară, care încarcă defavorabil dinții transmisiei cu roți dințate, arborele motorului și lagărele.

Suspendarea elastică a motorului la un capăt micșorează numai parțial solicitările dinamice provocate de neregularitățile căii.

Pentru micșorarea sensibilă a solicitărilor dinamice asupra transmisiei dințate, pentru a îmbunătăți protecția motorului contra șocurilor care provin de la cale și în același timp pentru a face demarajul mai liniștit și mai puțin dur, se poate introduce o anumită elasticitate de rotație în angrenaj, în sen-

sul construirii elastice fie a roții dințate, fie a pinionului (se preferă roata mare dințată elastică).

Dispoziția schematică a unei roți dințate elastice este prezentată în figura 7.15.

În coroana dințată, care este demontabilă, se practică niște alveole. Corpul roții se execută cu niște pinteni, care la montaj intră la jumăta-

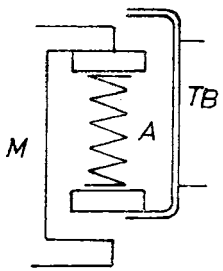



*Fig. 7.13.* Legătură elastică realizată cu arcuri: *M* — motor *TB* — traversa boghiului; *A* — arcuri elicoidale.

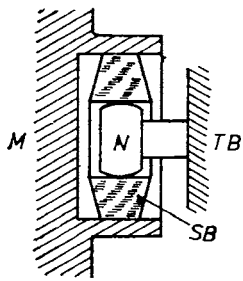



*Fig. 7.14.* Legătură elastică realizată cu silent blocuri: *SB* — silent bloc de cauciuc; *N* — nas.

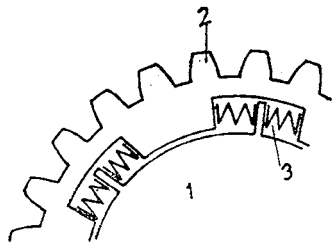



*Fig. 7.15.* Principiul unei roți dințate elastice: *1* — corpul roții; *2* — coroana dințată demontabilă; *3* — arcuri.

tea alveolei coroanei. Între pinten și fundul alveolei se introduc arcuri elicoidale sau blocuri de cauciuc.

*d) Domeniul de aplicare al motorului semisuspendat.* Așa cum s-a subliniat, motorul semisuspendat încarcă osia cu aproximativ jumătate din greutatea sa. Cum greutatea unui motor de tracțiune este apreciabilă (în funcție de putere, turație și dimensiuni de gabarit poate atinge 2 ... 4 tone), înseamnă că la trecerea peste denivelările căii, la joante și peste ace, se produc șocuri dinamice atît asupra căii, cît și asupra motorului, șocuri care conduc în timp la distrugerea căii și a motorului. Cum șocurile depind de viteza de circulație a locomotivei, înseamnă că viteza este elementul ce limitează utilizarea motorului semisuspendat la locomotive.

În construcțiile recente de locomotive pentru linii magistrale cu boghiuri motoare, motorul semisuspendat este folosit în general pînă la viteza de 110 km/h, adică își găsește utilizare la locomotivele de marfă sau la locomotivele pentru serviciu mixt.

În cazul automotoarelor, unde puterea necesară este mult mai mică, deci și greutatea motorului mult mai redusă (cazul automotoarelor electrice), motorul semisuspendat poate fi aplicat pînă la viteza de 120 km/h, dacă sarcina pe osie este sub limita admisă.

*e) Forțele introduse de motorul semisuspendat asupra părții mecanice a locomotivei.* Prin suspensie (așezare) și modul de transmitere a cuplului la osie, următoarele forțe trebuie luate în considerare (fig 7.9 și fig. 7.10):

— Forța tangențială ($Z$) din angrenaj care se aplică în punctul de calare al roții dințate pe osie și de ea se ține seamă la calculul osiei. Ea se deter-

mină din echilibru de momente:

$$ZR_d = F_0 \frac{D_0}{2}.$$

$F_0$ se determină pentru condiția limitării forței de tracțiune după aderența (aceasta este valoarea ei maximă), $F_0 = G_0\varphi_a$; $D_0$ se ia pentru situația roții cu bandaj nou.

— Reacțiunea ($R_a$) din punctul de suspensie a motorului de traversa boghiului, care servește la dimensionarea suspensiei și traversei de sprijin a motorului (dimensionarea cadrului boghiului). Ea se determină din echilibru de momente:

$$R_a d = F_0 \frac{D_0}{2},$$

(pentru $F_0$ și $D_0$ aceleași condiții ca mai sus).

Sarcina pentru dimensionare va fi, evident, $Q = R_a + \frac{G_m}{2}$ ($G_m$ — greutatea motorului).

— Forțele din palierele de sprijin ale motorului ($P$, $P'$) pe osie și care servesc la dimensionarea osiei. Ele se determină din ecuațiile de momente față de punctele $E$, $E'$:

$$P'b - R_a c - Za = 0$$

$$-Z(a + b) - Pb + R_a(b - c) = 0.$$

Sarcinile pentru dimensionare vor fi, evident, $P + \frac{G_m}{4}$ și $P' + \frac{G_m}{4}$.

*f) Elemente de dimensionare a legăturii elastice dintre motor și boghiu.* În soluția realizării legăturii elastice cu arcuri elicoidale, notînd cu:

$Q$ — forța de dimensionare, determinată ca mai sus;

$n_a$ — numărul de arcuri.

Sarcina pe un resort este:

$$q = \frac{Q}{n_a}.$$

Solicitarea materialului pentru arc se verifică cu relația:

$$\tau = 16 \cdot \frac{q \cdot r}{\pi d^3} \text{ kg/mm}^2.$$

Rigiditatea resortului este dată de relația:

$$\gamma = \frac{G \cdot d^4}{64 \cdot n_s \cdot r^3} \text{ kg/mm}.$$

Săgeata resortului la sarcină maximă va fi:

$$f = \frac{q}{\gamma} \text{ mm.}$$

În aceste relații s-a notat:

$d$ — diametrul sîrmei resortului, în mm;

$n_s$ — numărul de spire al unui arc;

$r$ — raza spirelor resortului, în mm;

$G$ — modulul de elasticitate transversal egal cu 8.500 kg/mm².

Pentru o locomotivă electrică, avînd ca date:

— diametrul roții motoare . . . . . $D_0 = 1200$ mm;

— sarcina pe osie . . . . . $G_0 = 20$ t;

— distanța de la osie la punctul de suspensie al motorului $d = 1\,150$ mm;

— greutatea motorului de tracțiune . . . . . $G_m = 4\,330$ kg

rezultă:

— forța maximă de tracțiune:

$$F_0 = 1\,000 \cdot G_0 \cdot \varphi = 1\,000 \cdot 20 \cdot 0{,}33 = 6\,600 \text{ kg;}$$

— reacția motorului asupra arcurilor:

$$R_a = \frac{F_0 \frac{D_0}{2}}{a} = \frac{6\,600 \cdot 600}{1\,150} = 3\,430 \text{ kg;}$$

— încărcarea totală a arcurilor:

$$Q = R_A + \frac{G_m}{2} = 3\,430 + \frac{4\,330}{2} = 5\,595 \text{ kg.}$$

Adoptînd patru arcuri, sarcina pe un arc va fi:

$$q = \frac{5\,595}{4} = 1\,399 \text{ kg.}$$

Adoptînd pentru arc: diametrul sîrmei de arc $d = 20$ mm, raza spirei arcului $r = 34$ mm și numărul spirelor unui arc $n_s = 7$, efortul unitar în arc va fi:

$$\tau = 16 \frac{q \cdot r}{\pi d^3} = 16 \frac{1\,399 \cdot 34}{3{,}14 \cdot 20^3} = 30{,}2 \text{ kg/mm}^2.$$

Rigiditatea arcului:

$$\gamma = \frac{G \cdot d^4}{64 \cdot n_s \cdot r^3} = \frac{8\,500 \cdot 20^4}{64 \cdot 7 \cdot 34^3} = 78 \text{ kg/mm}^3.$$

Săgeata arcului sub sarcina maximă:

$$f = \frac{q}{\gamma} = \frac{1\,399}{78} = 17{,}9 \text{ mm.}$$

Dacă înălțimea totală a arcului în stare liberă este 208 mm, în cazul solicitării celei mai defavorabile cînd este solicitat și de reacția motorului și de jumătate din greutatea motorului, între spirele arcului va rămîne un joc de:

$j = 208 - 20.7 - 17{,}9 = 50{,}1$ mm (jocul nu trebuie să fie zero).

7.3.3. **Motorul suspendat cu antrenarea osiei prin angrenaj suspendat.** Pentru a proteja complet motoarele de tracțiune de șocurile mecanice datorate căii și pentru a descărca complet osia de greutatea motorului, acesta se așază pe partea suspendată a locomotivei, fie pe șasiul cutiei fie pe cadrul boghiului. În prezent mai toate locomotivele electrice moderne cu viteză constructivă peste 100 km/h au motoarele de tracțiune complet suspendate, iar în privința așezării (suspensiei) se folosește cadrul boghiului; soluția suspensiei motorului pe șasiul cutiei este părăsită.

Datorită așezării motorului pe partea suspendată a locomotivei, axa motorului nu mai poate rămîne paralelă cu axa osiei și nici la distanță constantă; cele două axe prezintă una față de cealaltă variații de distanță sau deplasări unghiulare.

Pentru rezolvarea acestei probleme este necesară introducerea unei transmisii elastice, care să permită deplasări relative între axa motorului și axa osiei antrenate, servind în același timp și la transmiterea cuplului motor.

Angrenajul (pinionul motorului și roata dințată) poate fi solidar cu motorul suspendat; în acest caz legătura elastică se plasează între roata mare dințată și roata motoare pe care o antrenează.

Roata mare dințată poate fi calată pe osie, în care caz legătura elastică se plasează între arborele motorului și pinion.

*a. Transmisia A.E.G.* Principiul constructiv este redat în schița de ansamblu din figura 7.16, de unde se poate vedea că această variantă comportă

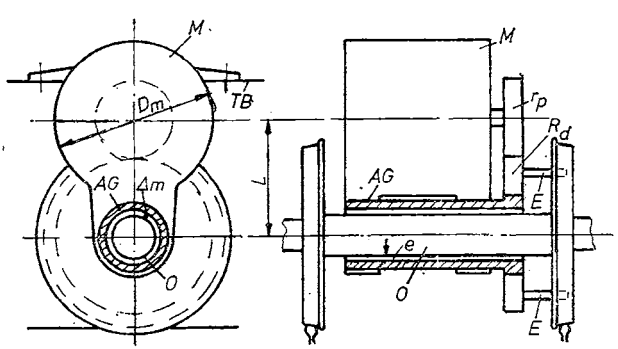



*Fig. 7.16.* Motor suspendat cu arbore gol, angrenaj suspendat și legătură elastică între angrenaj și roata motoare: *M* — motor; *TB* — traversa boghiului; *AG* — arbore gol; *O* — osie; $r_p$, $R_d$ — angrenaj; *E* — legătura elastică.

un arbore gol (tub) care îmbracă osia și pe care este fixată (calată) coroana dințată și palierele de sprijin ale motorului. Motorul, angrenajul (în această soluție angrenajul este suspendat) și arborele gol formează un ansamblu

comun şi este suspendat pe o traversă a boghiului, deci antraxul $L$ este constant şi ca urmare funcţionarea angrenajului nu este stînjenită. Legătura elastică este plasată între coroana dinţată şi roata motoare, ea servind şi la preluarea jocului între osie şi boghiu şi la transmiterea cuplului motor. Caracteristic acestui tip de transmisie este modul de realizare a legăturii elastice cu ajutorul unor oale cu arcuri, a cărei schiţă de ansamblu este redată în figura 7.17 şi detaliul oalei cu arc în figura 7.18.

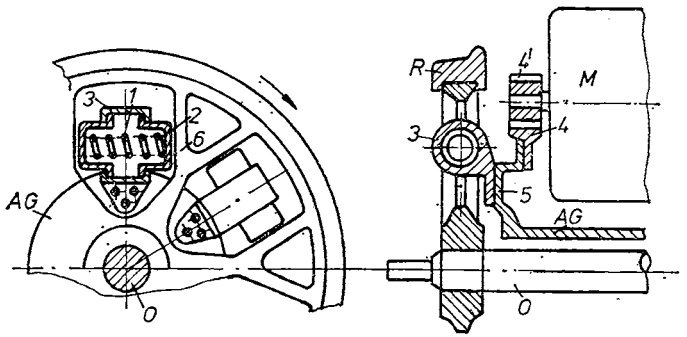



*Fig. 7.17.* Transmisie elastică realizată cu oale cu arcuri.

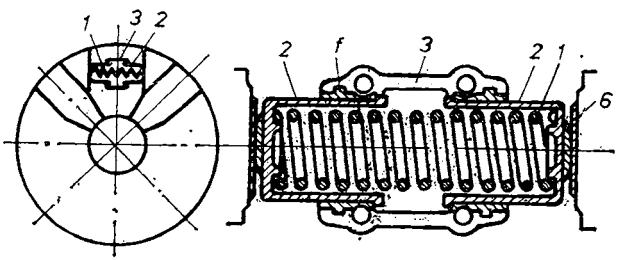



*Fig. 7.18.* Oală cu arc.

Arcul elicoidal *1* se introduce într-o oală *2*, formată din două jumătăţi (pahare), care se aşază între spiţele roţii. Cele două jumătăţi ale oalei sînt cuprinse de manşonul *3* fixat de roata mare dinţată, care la rîndul ei este solidară cu arborele gol.

Oala cu arc împreună cu manşonul se pot deplasa pe verticală între cele două spiţe.

Motorul de tracţiune, prin pinionul de atac *4'* (fig. 7.17), angrenează coroana dinţată *4*, fixată pe discul *5* (prelungirea arborelui gol); manşonul *3* este fixat pe discul *5*.

Pentru rotirea roţii în sensul săgeţii, manşonul *3* antrenează paharul *2* stînga prin flanşa 3 (fig. 7.18) comprimînd resortul elicoidal *1*, care apasă asupra paharului *2* dreapta şi acesta asupra braţului spiţei *6*. Arcul elicoidal *1*, pentru ambele sensuri de mers, este supus numai la compresie. Întrucît suprafeţele de alunecare a celor două braţe de spiţe *6* sînt paralele, grupul de pahare poate să se deplaseze foarte uşor între ele.

Atunci cînd masa suspendată a locomotivei oscilează, arcurile elicoidale care ocupă poziţia verticală preiau o parte din supraîncărcarea arcurilor de

suspensie. Pentru acest motiv, se cere ca arcurile elicoidale să nu aibă o rigiditate prea mare pentru a nu prelua prea mult din supraîncărcarea arcurilor suspensiei normale a locomotivei.

Arcurile aflate în poziție verticală vor primi o săgeată egală cu deplasarea verticală a masei suspendate, față de poziția lor normală. Celelalte arcuri, înclinate cu un unghi $\alpha$ față de orizontală, vor avea deplasări proporționale cu cos $\alpha$, deci și solicitările lor vor fi proporționale cu cos $\alpha$ (fig. 7.19).

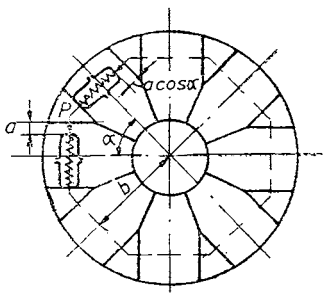



*Fig. 7.19.* Schema solicitării arcurilor din oale.

Odată cu rotirea roții variază și unghiul $\alpha$ și în consecință vor varia și solicitările suplimentare asupra arcurilor care pot produce, în sens invers masei suspendate, vibrații periculoase, mai ales dacă perioada acestor solicitări suplimentare se apropie de perioada oscilațiilor proprii ale masei suspendate.

Pentru evitarea acestui lucru, numărul arcurilor elicoidale se alege astfel, încît suma proiecțiilor pe verticală ale solicitărilor lor suplimentare să rămînă constantă, în timpul variației unghiului $\alpha$. Această condiție este îndeplinită atunci cînd numărul oalelor cu arcuri este par.

În cazul a opt arcuri elicoidale, ca în figura 7.19, dacă unul din arcuri este situat la unghiul $\alpha$ față de un anumit punct de reper, celelalte vor forma unghiurile: $\alpha + 45°$, $\alpha + 90°$, $\alpha + 135°$, $\alpha + 180°$, $\alpha + 225°$, $\alpha + 270°$ și $\alpha + 315°$.

Dacă masa suspendată se deplasează în jos cu distanța $a$, rigiditatea arcului fiind $\gamma$, atunci:

$a \cdot \cos\alpha$; $a \cdot \cos(\alpha + 45)$ ... reprezintă cantitatea cu care se comprimă arcul respectiv;

$\gamma \cdot a \cdot \cos\alpha$; $\gamma \cdot a \cdot \cos(\alpha + 45°)$ ... reprezintă variația forțelor din diverse arcuri.

Suma proiecțiilor pe verticală ale sarcinilor suplimentare va fi:

$$\Sigma\Delta P = \gamma \cdot a\,[\cos^2\alpha + \cos^2(\alpha + 45) + \ldots + \cos^2(\alpha + 315)].$$

Ținînd seamă că:

$$\cos^2(\alpha + 90) = \sin^2\alpha$$

$$\cos^2(\alpha + 135) = \sin^2(\alpha + 45)$$

. . . . . .

. . . . . .

și

$$\sin^2\alpha + \cos^2\alpha = 1,$$

rezultă

$$\Sigma\Delta P = 4\gamma \cdot a.$$

Pentru cazul folosirii a șase arcuri elicoidale, pe baza considerentelor de mai sus, rezultă:

$$\Sigma\Delta P = \gamma a\,[\cos^2\alpha + \cos^2(\alpha + 60) + \ldots + \cos^2(\alpha + 300)];$$

$$\Sigma\Delta P = 3\gamma a.$$

Cazurile folosirii a șase sau opt oale cu arc sînt cele curente și se observă că în ambele situații suma proiecțiilor pe verticală este constantă în timpul rotirii roților și în consecință solicitările suplimentare ale arcurilor din oale nu produc vibrații periculoase asupra masei suspendate a locomotivei.

Dimensionarea arcurilor elicoidale se face pentru forța maximă de tracțiune limitată de aderență pentru o osie $F_0$.

Dacă:

$D_0$ este diametrul roții motoare;

$b$ — distanța la care se așază arcurile față de centrul osiei;

$n_a$ — numărul de arcuri (oale) pentru ambele roți ale unei osii motoare, atunci se poate scrie relația:

$$F_0 \frac{D_0}{2} = \Sigma P \cdot b.$$

Sarcina care revine pe un arc va fi:

$$P = \frac{F_0 \cdot D_0}{2b \cdot n_a}.$$

Se recomandă ca la solicitarea maximă a arcului și la oscilațiile cele mai mari ale locomotivei, arcul să păstreze o rezervă de comprimare de 10 ... ... 15 mm.

Între arborele gol și osie se lasă un joc ($e$) de 35...40 mm pentru ca la cele mai mari deplasări ale osiei față de partea suspendată a locomotivei, osia să nu atingă arborele gol.

Arborele gol se confecționează din tablă de oțel de 30 mm, cu o cusătură de sudură trasă longitudinal.

*b. Transmisia elastică Alsthom.* Soluția face parte din aceeași categorie cu cea tratată mai sus (arbore gol, angrenaj suspendat, legătură elastică între angrenaj și roată) diferențierea constînd în modul de realizare a legăturii elastice. Schema de principiu este redată în figura 7.20.

Roata dințată este calată rigid pe un arbore gol ce înconjoară osia. Întregul ansamblu roată dințată—arbore gol este susținut prin palierele motorului de partea suspendată a locomotivei.

Roata dințată are două manetoane $M_1$, $M_2$ diametral opuse, care trec prin deschideri largi practicate în roata motoare. Roata motoare este de asemenea prevăzută cu două manetoane $M_1'$ și $M_2'$, diametral opuse.

Transmiterea cuplului de la manetoanele roții dințate la manetoanele roții motoare se face prin intermediul unui „inel dansant" $I$ legat în patru puncte de cele patru manetoane prin bieletele $B$. Toate articulațiile biele-

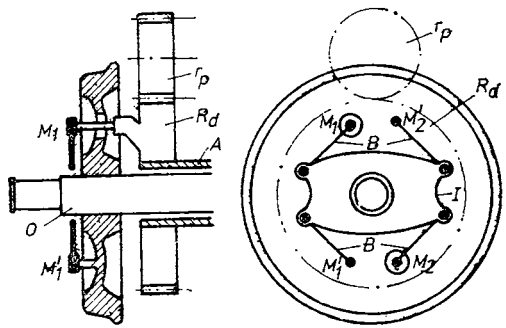



*Fig. 7.20.* Transmisie elastică realizată cu bielete și inel dansant.

telor sînt prevăzute cu silent-blocuri de cauciuc, care asigură elasticitatea necesară transmisiei.

7.3.4. **Motor suspendat cu antrenarea osiei prin angrenaj semisuspendat.** Transmisia cu arbore cardanic, aplicată universal pe vehiculele rutiere, își găsește aplicație și pe materialul rulant cu motor electric (automotoare și locomotive electrice).

Soluțiile posibile de a instala motorul electric și transmisia cu arbore cardanic pe o locomotivă sînt indicate în figura 7.21.

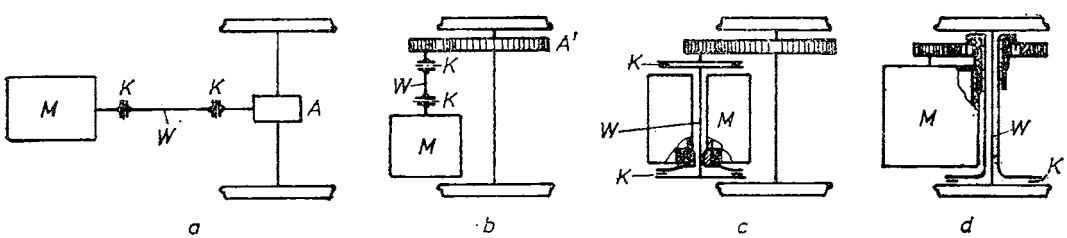



*Fig. 7.21.* Transmisie cu arbore cardanic : *a* — amplasarea longitudinală a motorului (angrenaj conic —*A*) ; *b* — amplasarea transversală a motorului (angrenaj cilindric — *A'*) ; *W* — arbore cardanic ; *K* — cruci cardanice.

În cadrul boghiului, motorul de tracțiune se poate instala fie longitudinal (axa motorului perpendiculară pe axa osiei), fie transversal (axa motorului paralelă cu axa osiei).

Dispunerea longitudinală a motorului (fig. 7.21, *a*) nu ridică în general dificultăți la realizarea lungimii necesare a arborelui cardanic, cunoscînd că, pentru a lucra în condiții favorabile, arborele cardanic trebuie să aibă o lungime suficientă.

Soluția este răspîndită la tramvaie și automotoare, unde este suficient un motor pe boghiu, iar valoarea cuplului de transmis este mică.

La locomotive, această dispoziție ridică două inconveniente majore:

— mărește ampatamentul boghiului, împiedicînd înscrierea în curbe de rază mică, dacă este vorba să se instaleze pentru fiecare osie cîte un motor de antrenare;

— exclude utilizarea angrenajelor cilindrice, simple și robuste, obligînd folosirea reductoarelor cu șurub fără sfîrșit, sau a angrenajelor conice, mai complicate și mai delicate.

Dispunerea transversală a motorului (fig. 7.21, *b*) ridică problema dificilă ca, în spațiul restrîns disponibil dintre roți, să se amplaseze în linie motorul, arborele cardanic și angrenajul. Soluția nu este posibilă decît în cazul vehiculelor de putere relativ mică.

Combinînd aceste soluții, s-a ajuns la varianta prezentată în figura 7.22, adică indusul motorului se realizează tubular (indus gol) prin care se trece arborele de torsiune, iar legăturile arborelui de torsiune la rotor (la capătul opus angrenajului) și la pinion se face prin legături elastice. Deci, legătura elastică se realizează între arborele motorului și pinion, roata dințată este calată pe osie și carcasa angrenajului prinsă elastic de cadrul boghiului (angrenaj semisuspendat).

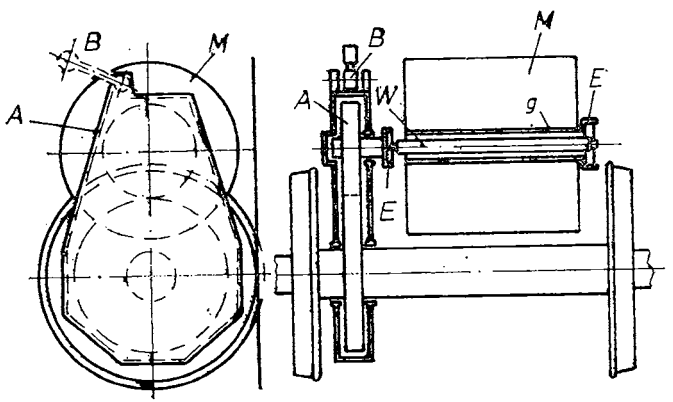



*Fig. 7.22.* Motor suspendat (cu butucul rotorului gol), transmisia cu arbore de torsiune și angrenaj semisuspendat: *M* — motor suspendat; *g* — golul practicat în butucul rotorului; *W* — arbore de torsiune: *E* — legături elastice (în locul crucilor cardanice clasice); *A* — angrenaj (semisuspendat); *B* — legătura (elastică) de prindere a angrenajului de cadrul boghiului.

Pe principiul acestei soluții sînt realizate transmisiile multor locomotive electrice de construcții recente, variantele diferind prin modul de realizare a legăturilor elastice. În cele de mai jos se prezintă două soluții mai reprezentative.

*a. Transmisia BBC cu discuri.* La acest tip de transmisie angrenajul (coroana dințată calată rigid pe osie și pinionul) este semisuspendat, iar legătura elastică este realizată între arborele indusului și pinionul motorului (pinionul este realizat cu un arbore scurt propriu solidar cu carcasa angrenajului).

Elementele constructive ale acestei transmisii sînt prezentate în schița de ansamblu din figura 7.23, iar un detaliu sugestiv în figura 7.24. Butucul rotorului ($R$) este găurit și prin el este trecut arborele de torsiune $W$.

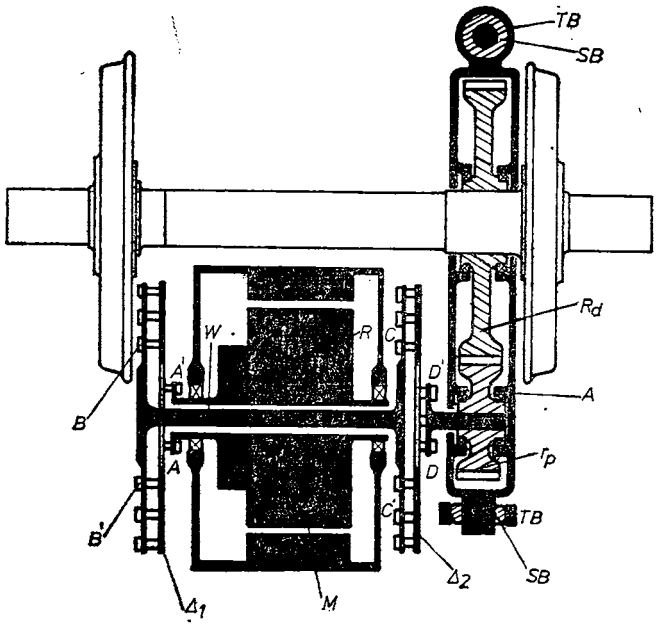



*Fig. 7.23.* Transmisia elastică *BBC* cu discuri (ansamblu).

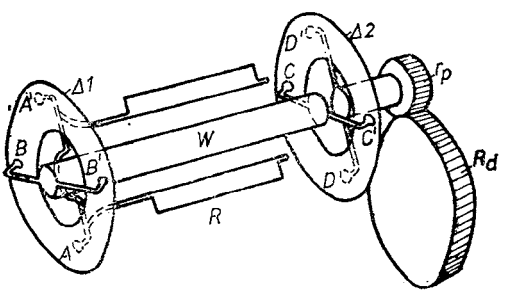



*Fig. 7.24.* Transmisia elastică *BBC* cu discuri (detaliu).

Indusul motorului de tracțiune atacă, prin brațele $A$, $A'$, discul de oțel $\Delta_1$, care la rîndul său, prin brațele $B$, $B'$ dispuse la 90°, transmite mișcarea arborelui de torsiune $W$. Acest arbore are la cealaltă extremitate brațele $C$, $C'$ care antrenează al doilea disc de oțel $\Delta_2$ și de la care pinionul $r_p$ este antrenat de brațele $D$, $D'$.

Transmisia nu comportă articulații, resorturi sau blocuri de cauciuc. Elasticitatea ei este dată de flexibilitatea discurilor de oțel. Acest tip de transmisie reclamă o întreținere extrem de redusă.

Carcasa angrenajului ($A$) este prinsă elastic cu un sistem cu silent blocuri de cauciuc ($SB$) de cadrul boghiului ($TB$).

*b. Transmisia elastică ASEA* (este folosită pe locomotivele electrice CFR 060—EA, 040—EC). Dispoziția generală a acestei soluții este prezentată în figura 7.25 (secțiune schematică văzută în plan orizontal).

Elementele principale constructive ale transmisiei *ASEA* sînt următoarele:

— motorul de tracțiune ($M$), complet suspendat, are butucul rotorului realizat gol ($AG$); $r_1$, $r_1'$ sînt rulmenții dintre rotorul și statorul motorului;

— prin rotor este trecut arborele de torsiune ($W$) care este antrenat de rotorul motorului (la capătul opus angrenajului) prin angrenajul $r_p' - c'$ ($r_p'$ — pinion calat pe arborele de torsiune; $c'$ — coroană dințată cu dantură interioară, fretată în carcasa $a$ a angrenajului prinsă rigid de butucul rotorului); angrenajul $r_p' - c'$ lucrează în ulei și evident carcasa sa este etanșată, prin garnituri, contra scăpării uleiului spre interiorul arborelui gol, ca și spre exterior;

— angrenajul de tracțiune este alcătuit din carcasa $A$ care lăgărueşte pe osie (butucul coroanei dințate $R_p$) prin rulmenții $r_2$, coroana mare dințată ($R_p$) calată rigid pe osie, pinionul ($r_p$) calat rigid pe arborele său scurt $b$; pinionul lăgărueşte în carcasa angrenajului prin rulmenții $r_3$;

— legătura elastică dintre arborele motorului ($W$) și pinionul angrenajului ($r_p$) este realizată prin cuplajul elastic (Layrub). E alcătuit din discul $d$ solidar cu arborele de torsiune, butucul $e$ fretat pe arborele pinionului și opt lagăre de cauciuc (silent-blocuri — $f$) care face legătura între $d$ și $e$;

— carcasa angrenajului (denumită și tobă) este prinsă elastic de boghiu prin intermediul unui lagăr de cauciuc $g$ (alcătuit din jugul $h$ atașat la carcasă, bulonul cu excentric $i$) și al unei bielete înclinate (nefigurată pe fig. 7.25) prinsă cu un capăt la acest lagăr și cu celălalt la cadrul boghiului. Șurubul excentric servește la reglarea coaxialității axei pinionului cu axul arborelui de torsiune. În ipoteza că bieleta de prindere a carcasei de boghiu s-a rupt, pentru evitarea rotirii angrenajului în jurul osiei, angrenajul mai are o prindere de siguranță realizată constructiv similar cu bieleta menționată mai sus. Angrenajul de tracțiune lucrează de asemenea în ulei și este prevăzut, evident, cu garniturile necesare pentru împiedicarea scurgerii uleiului.

Așadar, transmiterea elastică a cuplului motorului la osie și preluarea deplasărilor pe verticală între osie și motor se fac prin elementele: cuplajul rotorului ($r_p' - c'$), arborele de torsiune ($W$) și legătura elastică ($E$) între motor și pinion. Diferența de diametre între golul indusului și arborele de torsiune (cota $\varepsilon$) se alege astfel ca ea să fie mai mare decît amplitudinea pe verticală a oscilației suspensiei boghiului (de obicei $\varepsilon = 40 \ldots 50$ mm).

*Forțele introduse de motorul suspendat asupra părții mecanice a locomotivei (se tratează cazul transmisiei ASEA)*

Motorul de tracțiune (LJE—108) se sprijină pe cadrul boghiului în trei puncte, prin intermediul unor brațe (console) atașate carcasei motorului. În figura 7.26 s-a reprezentat schematic modul de așezare a motorului, iar în figura 7.27 modul de suspensie a carcasei angrenajului de cadrul boghiului.

Față de osia $O_1$ motorul este amplasat în spatele ei, față de $O_2$ în fața ei (fig. 7.26).

În punctele de sprijin pe boghiu apar forțe datorate greutății motorului și transmiterii cuplului motor; în punctul de calare a coroanei dințate pe osie se transmite o forță datorată cuplului motor; în punctul de prindere a angrenajului se transmite o forță datorată tot cuplului motor. Valoarea

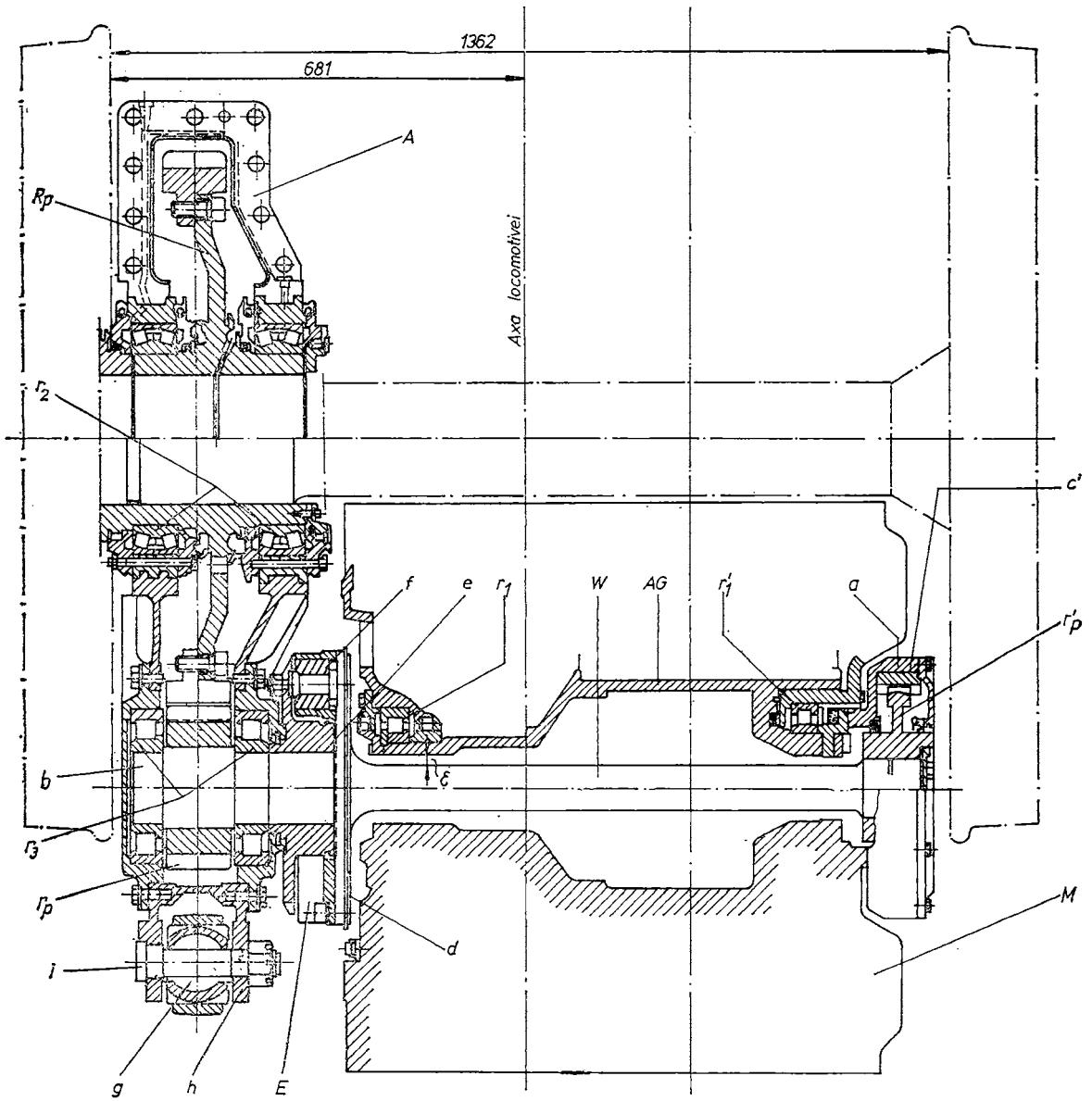



*Fig. 7.25.* Transmisia *ASEA* (aplicată pe LE—CFR).

acestor forțe care servesc la dimensionarea părții mecanice se deduc din ecuații de momente.

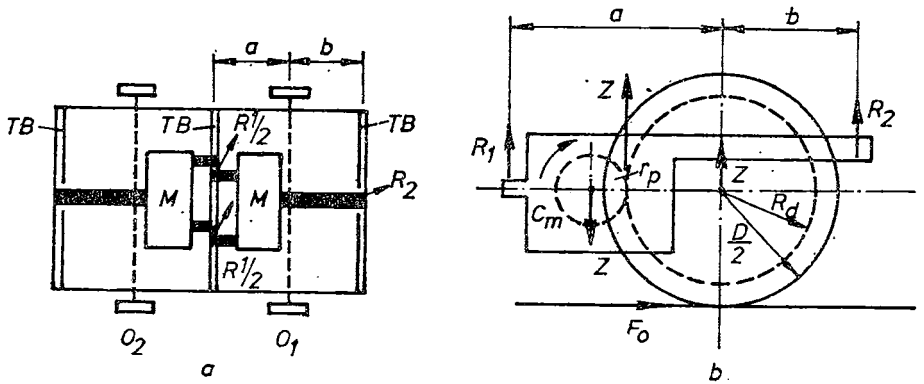



*Fig. 7.26.* Suspensia motorului LJE 108 pe cadrul boghiului : *a* — cadrul boghiului cu indicarea schematică a punctelor de sprijin (*TB* — traversele de sprijin) ; *b* — secțiune prin motor cu indicarea brațelor de sprijin.

Cu notațiile din fig. 7.27, se poate scrie:

$$ZR_d = F_0 \frac{D}{2}; \quad Z = F_0 \frac{D}{2R_d}$$

(se stabilește în aceleași condiții ca la motorul semisuspendat și de ea se ține seamă la calculul osiei).

Forța $Z$ se transmite la osie în punctul de calare a coroanei dințate. Aceeași forță $Z$ acționează și asupra carcasei angrenajului prin lagărele acestuia în punctul $O_p$, transmițîndu-se ca atare.

Forța $Z'$ în punctul de fixare a carcasei angrenajului de cadrul boghiului rezultă din:

$$Z' l_r - Z(R_d + r_p) = 0;$$

$$Z' = Z \frac{R_d + r_p}{l_r} = \frac{F_0 D}{2 l_r} \left(1 + \frac{1}{u}\right),$$

unde $u = \frac{R}{r}$ este raportul de transmitere al angrenajului. De forța $Z'$ se ține seamă la dimensionarea bieletei ($b$) prin care se fixează angrenajul de boghiu și la dimensionarea traversei boghiului ($TB$) de care se prinde.

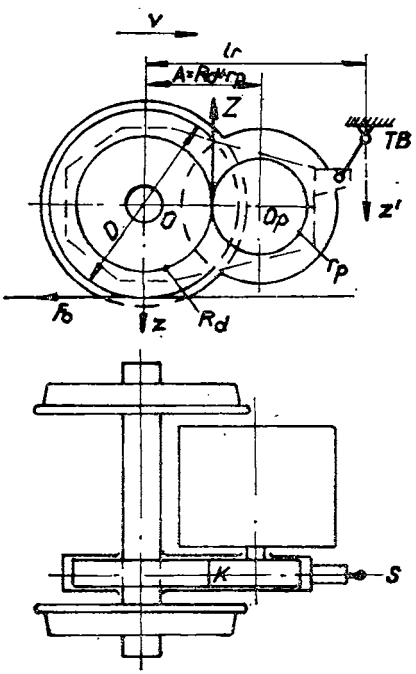



*Fig. 7.27.* Motorul LJE 108, prinderea carcasei angrenajului de boghiu.

Valoarea reacțiunilor motorului în punctele de sprijin pe traversele boghiului (fig. 7.27 — se tratează cazul unui boghiu *Bo* cu motorul plasat în spatele osiei $O_1$) rezultă din condițiile de echilibru al momentelor:

$$R_2(a+b) - Z(a - R_d - r_p) - C_m = 0 \tag{1}$$

$$R_1(a+b) - Z(R_d + r_p + b) + C_m = 0 \tag{2}$$

$$C_m = Z \cdot r_p; \quad Z = F_0 \frac{D}{2R_d}. \tag{3}$$

Din aceste relații rezultă:

$$R_1 = F_0 \frac{D}{2R_d} \cdot \frac{R_d + b}{a+b};$$

$$R_2 = F_0 \frac{D}{2R_d} \cdot \frac{a - R_d}{a+b}.$$

Forțele $R_1$, $R_2$ servesc la dimensionarea cadrului boghiului.

7.3.5. **Boghiu monomotor.** O altă soluție cu un singur motor suspendat pe boghiu de la care se acționează toate osiile (două sau trei) ale aceluiași boghiu prin angrenaje (fig. 7.8, *d*) este cunoscută sub denumirea de „boghiu monomotor". În fond este vorba de acționarea în grup a osiilor a căror îmbielare se face prin angrenaje (soluția cu acționarea în grup a osiilor prin sistem bielă-manivelă este părăsită de mult).

Locomotivele cu boghiu monomotor prezintă avantaje nete, în privința greutății, puterii instalate, aderenței și puterii specifice, față de locomotivele cu acționare individuală a osiilor.

Dintre avantajele oferite de o locomotivă cu boghiuri monomotoare, se menționează ca mai importante următoarele:

— repartizarea puterii pe două motoare de tracțiune, în cazul unei locomotive $B_0 - B_0$, în loc de patru motoare, conduce la o reducere a greutății la motoare de ordinul a 20%;

— cuplarea mecanică a osiilor aceluiași boghiu prin angrenaj atrage după sine o ameliorare a coeficientului de aderență de ordinul a 7% la demaraj și 15% la viteze medii (valori măsurate la locomotiva B—B 16500 a căilor ferate franceze);

— posibilitatea de a realiza locomotiva cu dublu raport de transmisie, care o face aptă pentru serviciul de marfă și de călători și deci îi imprimă un caracter de locomotivă universală;

— reducerea lungimii cablurilor, fiind vorba de conectat numai două motoare;

— reducerea aparatajului pentru inversarea sensului de mers și de reducere a cîmpului motoarelor;

— reducerea numărului de ventilatoare pentru motoarele de tracțiune;

— micșorarea ampatamentului boghiului (1 608 mm la locomotiva B—B 16500), ceea ce favorizează înscrierea în curbe la viteze mari;

— poziția motorului de tracțiune în centrul boghiului, care este foarte favorabilă unei bune ținute în cale a locomotivei. Această calitate este definită de mărimea raportului $K = \frac{4 \cdot m \cdot \rho^2}{l^2}$ care trebuie să fie cît mai mic ($m$ este masa boghiului; $\rho$ — raza de giratie a boghiului; $l$ — ampatamentul boghiului). La boghiuri $B$ cu două motoare de tracțiune $K = 10{,}3$, iar la boghiu monomotor $K = 8{,}3$; la boghiuri $C$ cu trei motoare de tracțiune $K = 15{,}1$, iar la boghiu monomotor $K = 12{,}5$. Cu cît raportul $K$ este mai mic, cu atît forțele exercitate transversal pe cale sînt mai reduse.

*a. Boghiu monomotor tip B cu un singur raport de transmitere.* O schemă a soluției constructive este prezentată în figura 7.28.

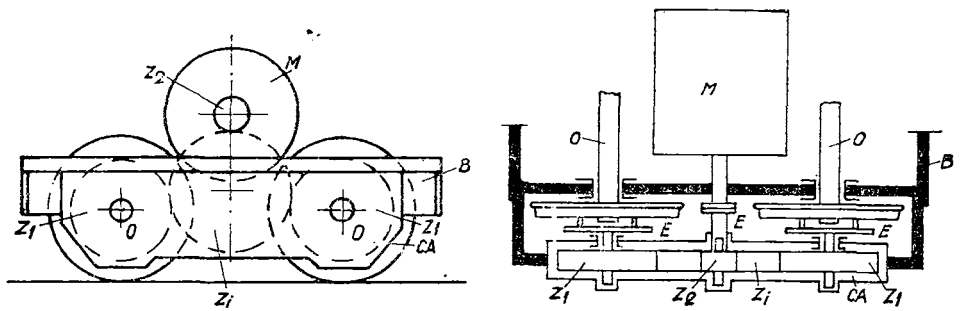



*Fig. 7.28.* Boghiu monomotor tip *B*, cu raport de transmitere unic.

Motorul de tracțiune ($M$) este suspendat pe cadrul boghiului ($B$). Trenul de angrenaje ($Z_2$ — pinionul motorului, nominalizat prin numărul său de dinți; $Z_1$ — roțile dințate pentru acționarea osiilor $O$; $Z_i$ — roata dințată intermediară) este fixat într-o carcasă separată ($CA$) montată în exteriorul roților și solidară cu cadrul boghiului. Pentru transmiterea cuplului motor și preluarea oscilațiilor (jocurilor) dintre partea suspendată și nesuspendată a locomotivei, între arborele motorului și pinion, precum și între roata mare dințată și roata motoare se introduc legături elastice ($E$).

Raportul de transmitere al lanțului cinematic de roți dințate va fi:

$$u = \frac{Z_1}{Z_i} \cdot \frac{Z_i}{Z_2} = \frac{Z_1}{Z_2},$$

adică nu depinde de roata intermediară $Z_i$.

În această variantă, boghiu monomotor cu raport de transmitere unic, nu se obișnuiește să se realizeze în mod curent boghiuri monomotoare.

*b. Boghiu monomotor tip B cu bireductor.* Avantajul realizării unui dublu raport de transmitere (bireductor) la un boghiu monomotor este evident întrucît permite aceleiași locomotive să realizeze două regimuri distincte în exploatare, pentru trenuri de călători și pentru trenuri de marfă. În scopul

precizării ideilor și evidențierii particularităților constructive ale boghiului monomotor cu bireductor, în cele de mai jos se prezintă datele constructive ale locomotivei B—B 16500 (SNCF) realizată în această variantă și cu rezultate remarcabile în exploatare.

Datele tehnice caracteristice ale locomotivei sînt următoarele:

| | |
|---|---|
| — curent la linia de contact | alternativ monofazat, 50 Hz, 25 kV; |
| — formula osiilor | $B - B$; |
| — greutatea totală și aderentă | 67 t; |
| — greutatea părții mecanice, inclusiv angrenajele | 38 t; |
| — greutatea părții electrice, inclusiv motoarele de tracțiune | 29 t; |
| — lungimea între tampoane | 14 400 mm; |
| — distanța dintre pivoturile boghiurilor | 8 200 mm; |
| — ampatamentul boghiului | 1 608 mm; |
| — lățimea cutiei | 2 985 mm; |
| — înălțimea locomotivei cu pantograful coborît | 3 630 mm; |
| — diametrul roții motoare (bandaj nou) | 1 100 mm. |

| | Regim călători | Regim marfă |
|---|---|---|
| — raport de transmisie | 1,880 | 3,216 |
| — viteza maximă constructivă | 150 | 90 km/h; |
| regim continuu: | | |
| — puterea la arbore | 3 500 | 3 500 CP; |
| — forța de tracțiune | 11,3 | 19,2 t; |
| — viteza | 82 | 48,5 km/h; |
| regim unionar: | | |
| — puterea la arbore | 3 600 | 3 600 CP; |
| — forța de tracțiune la demaraj | 19 | 32,4 t. |

În figura 7.29 și 7.30 sînt prezentate caracteristicile de tracțiune în cele două regimuri de tracțiune.

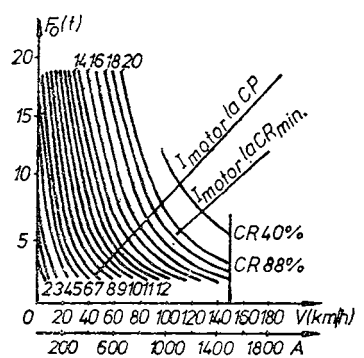



*Fig. 7.29.* Caracteristica de tracțiune a LE B—B 16500 în regim de călători.

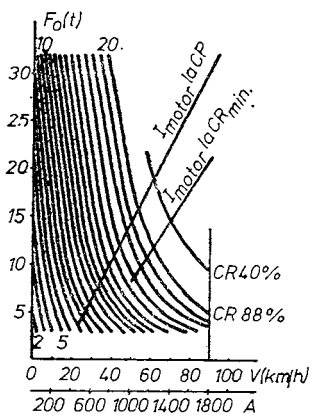



*Fig. 7.30.* Caracteristica de tracțiune a LE B—B 16500 în regim de marfă.

Suprapunînd ambele caracteristici pe o singură diagramă $F(V)$, se obține diagrama din figura 7.31 din care se observă o mare suprafață în planul $F(V)$ acoperită de acest tip de locomotivă, datorită folosirii dublului raport de transmisie, ceea ce imprimă o bună folosire și un caracter de locomotivă universală.

O locomotivă electrică avînd un singur raport de transmisie și capabilă să realizeze 19,2 t la regim continuu și 5,6 t la $V = 150$ km/h va trebui să prezinte o caracteristică de tracțiune ca în figura 7.31 reprezentată punctat și care conduce la o putere de ordinul a 3300 kW (4500 CP) și la o greutate de locomotivă de 80 t. Dublul raport de transmisie aduce avantajul unei economii de 600 kW (950 CP) la puterea instalată și 13 t la greutatea locomotivei.

De asemenea, este de semnalat că dublul raport de transmisie favorizează randamentul electric, în sensul că modificarea raportului de transmitere permite funcționarea locomotivei în zonele randamentului optim.

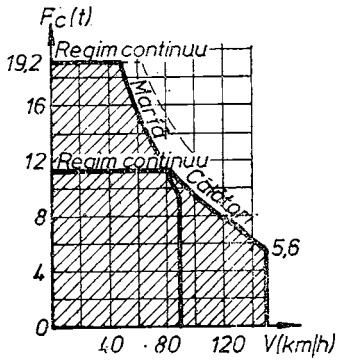



*Fig 7.31.* Caracteristicile de tracțiune ale LE B—B 16500 suprapuse pentru regim de călători și regim de marfă.

Schema cinematică a roților dințate pentru realizarea celor două rapoarte de transmitere este redată în figura 7.32.

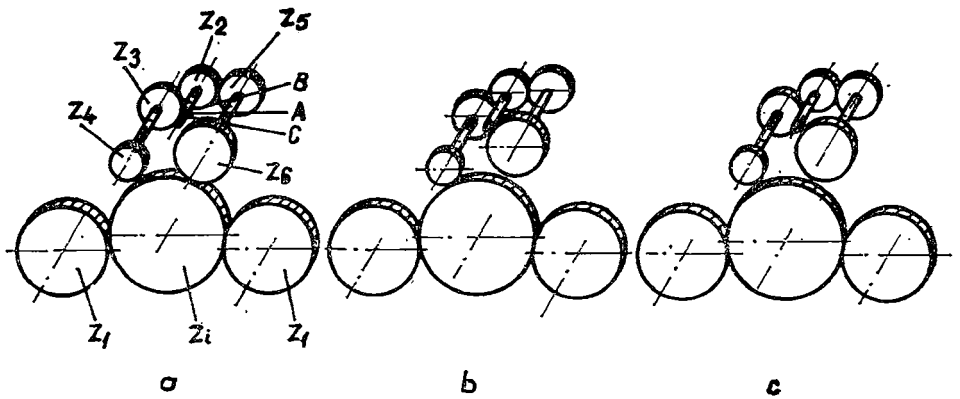



*Fig. 7.32.* Schema cinematică a bireductorului.

Pinionul motorului ($Z_2$) angrenează în permanență cu roțile dințate $Z_3$ și $Z_5$ care sînt pe același arbore cu roțile dințate $Z_4$ respectiv $Z_6$. Cînd angrenează roata dințată $Z_6$ cu $Z_i$ ($Z_4$ este scoasă din angrenare) se realizează raportul de transmitere $u_1$, cînd angrenează $Z_4$ cu $Z_i$ ($Z_6$ este scoasă din angrenare) se realizează raportul de transmitere $u_2$.

$$u_1 = \frac{Z_1}{Z_i} \cdot \frac{Z_i}{Z_6} \cdot \frac{Z_5}{Z_2} = \frac{Z_1}{Z_6} \cdot \frac{Z_5}{Z_2};$$

$$u_2 = \frac{Z_1}{Z_i} \cdot \frac{Z_i}{Z_4} \cdot \frac{Z_3}{Z_2} = \frac{Z_1}{Z_4} \cdot \frac{Z_3}{Z_2}.$$

Pentru locomotiva în chestiune: $Z_1 = 47$ dinți, $Z_i = 61$, $Z_2 = 21$, $Z_3 = 23$, $Z_4 = 16$, $Z_5 = 21$, $Z_6 = 25$ dinți, rezultă:

$$u_1 = \frac{47}{25} \cdot \frac{21}{21} = 1{,}880 \text{ (regim călători);}$$

$$u_2 = \frac{47}{16} \cdot \frac{23}{21} = 3{,}216 \text{ (regim marfă).}$$

Ansamblul bireductorului este reprezentat schematic în figura 7.33. Pinionul motorului și cele două trenuri de angrenaje ($Z_3$—$Z_4$, $Z_5$—$Z_6$; fig. 7.32) sînt incluse într-un cadru intermediar $CI$ (formează o cutie mecanică de viteze) și poate fi basculat prin pîrghia $P$, fie pentru angrenarea lui $Z_6$ (fig. 7.32, *a*; fig. 7.33, *a*) fie pentru angrenarea lui $Z_4$ (fig. 7.32, *b*; fig. 7.33, *b*), fie în poziție neutră (fig. 7.32, *c*; fig. 7.33, *c*). Carterul $C$ care cuprinde coroanele dințate de osie $Z_1$ și roata dințată intermediară $Z_i$ se fixează rigid de cadrul boghiului în exteriorul acestuia; între arborele motorului și pinion și între coroanele dințate ($Z_1$) și roțile motoare se introduc legăturile elastice ($E$).

Schimbarea raportului de transmisie se face manual cu locomotiva în staționare și nu durează decît cîteva minute.

Cînd manevra de schimbare a raportului de transmisie a fost făcută și roțile dințate au luat poziția corectă, carterul oscilant poate fi înzăvorît mecanic. Această înzăvorîre este controlată printr-o înzăvorîre electrică ce interzice pornirea locomotivei dacă angrenajele nu se află corect în priză pentru un regim sau dacă înzăvorîrea mecanică nu a fost efectuată. Dacă pozițiile reductoarelor nu sînt identice la cele două boghiuri, prin intermediul unor relee centrifuge plasate în capetele arborilor motoarelor de tracțiune se semnalizează defectul și se interzice pornirea locomotivei.

Punerea în angrenare a dinților roților dințate se efectuează foarte simplu, rotind indusul cu ajutorul unui al doilea levier ușor manevrabil în același timp cu levierul de manevră a carterului oscilant.

Dimensionarea lanțului cinematic al transmisiei se începe cu stabilirea ampatamentului boghiului, după ce s-a ales diametrul roții motoare. Între ampatament, diametrul roții mari dințate, diametrul roții intermediare și înălțimea centrului roții intermediare este o strînsă dependență (dealtminteri mărimea și poziția roții intermediare determină în mare măsură și amplasarea în plan orizontal a motorului de tracțiune). În figura 7.34 s-au reprezentat coroanele dințate $Z_1$ și roata dințată intermediară $Z_i$ prin diametrele cercurilor primitive $D_1$ și $D_i$, cu precizarea că garda la sol ($h'$) a ansamblului de roți dințate va trebui să fie aceeași. Din figură rezultă:

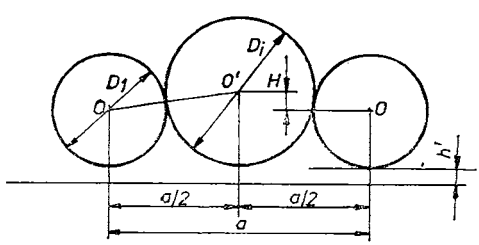



*Fig. 7.34.* Determinarea ampatamentului unui boghiu monomotor.

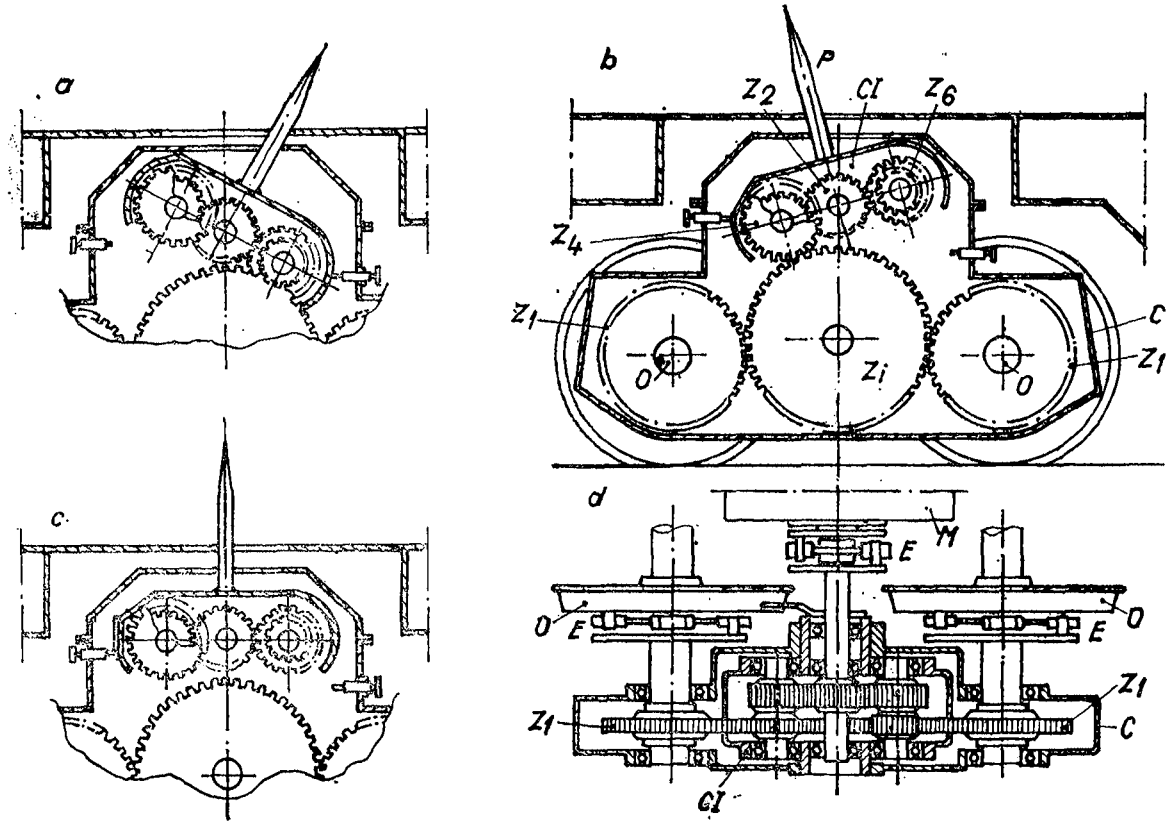



*Fig. 7.33.* Reprezentarea schematică a bireductorului: *a* — regim de călători; *b* — regim de marfă; *c* — poziția neutră; *d* — secțiune în plan.

Suprafnălțarea centrului roții intermediare ($H$) față de centrul osiilor:

$$H = \frac{1}{2}(D_i - D_1); \quad OO' = \frac{1}{2}(D_1 + D_i).$$

Semiampatamentul boghiului;

$$\frac{a}{2} = \sqrt{\left[\frac{1}{2}(D_1 + D_i)\right]^2 - \left[\frac{1}{2}(D_i - D_1)\right]^2} = \sqrt{D_1 D_i}.$$

Din aceste relații se observă că ampatamentul crește proporțional cu rădăcina pătrată a diametrului cercurilor primitive respective; pentru $D_i = 2D_1$, $a$ crește numai de 1,41 ori față de situația cînd $D_i = D_1$ (greutatea unei roți dințate însă crește cu pătratul diametrului; $H$ se înalță cu $\frac{1}{2}(D_i - D_1)$ peste centrul osiei. În practică se alege $D_i = (1{,}25 \ldots 1{,}35) D_1$ din motive constructive ca pinionul motorului să atace roata intermediară în planul superior al cadrului boghiului, rezultînd și un ampatament convenabil.

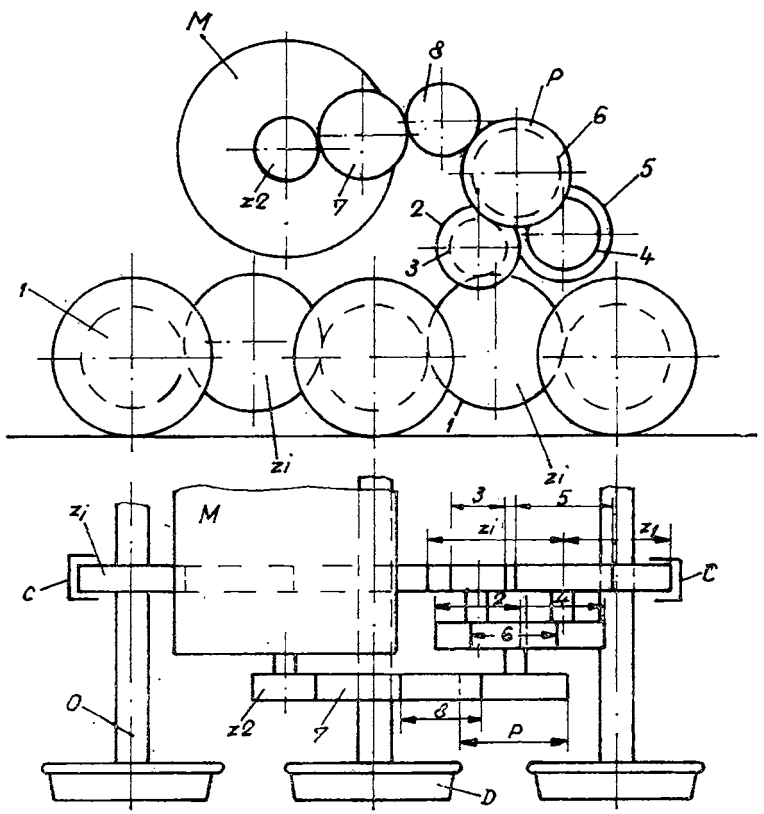



*Fig. 7.35.* Schema cinematică a unui boghiu monomotor tip $C_2$

*c. Boghiu monomotor tip C.* În ultima perioadă soluția monomotor a fost extinsă și la boghiuri pe trei osii (boghiu *C*) atît la locomotive electrice cît și la locomotive diesel electrice.

O reprezentare schematică a unui astfel de boghiu monomotor este redată în figura 7.35, unde s-au folosit aceleași notații ca în figurile precedente. Se observă că lanțul cinematic este mult mai complicat; necesită roțile intermediare $7 + 8$, pinionul $P$ pentru antrenarea arborelui de intrare în cutia de viteze similară cu aceea prezentată la boghiul tip $B$; roata dințată *3* în angrenare cu $Z_i$ determină un raport de transmitere, roata dințată *5* cu $Z_i$ asigură celălalt raport de transmitere.

Datorită complicațiilor constructive ce le introduce asupra părții mecanice a locomotivei, este de semnalat că în principal numai la căile ferate franceze sînt realizări de locomotive cu boghiuri monomotor (în special tipul *B*), alte administrații de cale ferată manifestă rețineri pentru această soluție din cauza complicațiilor în angrenaje care apare ca un sistem întîlnit în orologerie.

## 7.4. ANGRENAJUL DE TRACȚIUNE

7.4.1. **Generalități.** Așa cum s-a arătat mai sus (paragraf 3) acționarea osiei motoare se face folosind un angrenaj cu roți dințate cilindrice (cu dinți drepți sau oblici), acestea fiind mai simple și mai robuste. Cîteva noțiuni generale recapitulative specifice roților dințate sînt indicate pe figura 7.36.

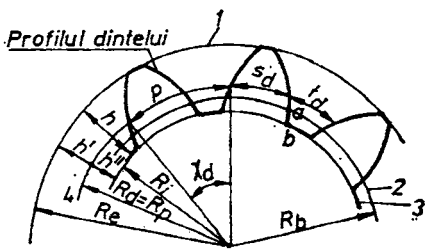



*Fig. 7.36.* Parametrii de definire a unei roți dințate.

— Profilul dinților (flancurile) se realizează aproape în exclusivitate după o curbă denumită evolventă (această curbă se trasează grafic după metode riguroase și se realizează practic cu mașini speciale de danturare).

— Cercul exterior al danturii (marcat prin raza $R_e$).

— Cercul interior (marcat prin raza $R_i$), limitează fundul dintelui de corpul roții.

— Cercul primitiv sau de divizare (notat cu $R_d$); se face precizarea că aceste cercuri coincid numai în cazul danturii necorijate.

— Pasul danturii (standardizat) este distanța dintre flancurile de același sens a doi dinți consecutivi măsurată pe cercul de divizare:

$$p = \frac{2\pi R_d}{Z};$$

$Z$ — numărul dinților (totdeauna număr întreg).

— Modulul dinților este definit cu raportul dintre lungimea cercului de divizare și numărul dinților:

$$m = \frac{2 R_d}{Z}.$$

Între pas și modul rezultă relația: $p = \pi m$.

Modulul este o mărime standardizată, iar pentru angrenajele de tracțiune poate fi luată în considerare următoarea gamă (valorile din paranteză nu sînt recomandabile):

$m(mm)$: 5; 5,5; 6; 6,5; 7; 8; 9; 10; 11; 12; (13); 14; (15); (16); (18); 20.

Pentru ca un angrenaj să poată funcționa trebuie ca ambele roți (pinionul și coroana) să aibă același modul.

— Înălțimea dintelui (cota $h$) se compune din vîrful dintelui ($h'$) și baza dintelui ($h''$) care se pot stabili cu relațiile:

$$h' = \gamma' m; \quad h'' = \gamma'' m.$$

$\gamma'$, $\gamma''$ sînt coeficienți de înălțime ale căror valori recomandate pentru angrenaje de tracțiune sînt:

- pentru coroana dințată $\gamma' = 0{,}5$; $\gamma'' = 1{,}7$;
- pentru pinion $\gamma' = 1{,}5$; $\gamma'' = 0{,}7$.

7.4.2. **Elemente de calcul.** Un calcul orientativ pentru angrenaj constă în determinarea numărului dinților, dimensiunile acestora, diametrele roților, calculul la uzură în scopul alegerii materialelor și calculul randamentului. După stabilirea dimensiunilor geometrice se verifică înscrierea în gabarit a angrenajului (v. fig. 7.11).

Recomandări practice pentru angrenajele de tracțiune:

— valoarea modulului, $m \geqslant 10$;

— valoarea unghiului de angrenare, 20°;

— numărul dinților pinionului, $Z_{2\,min} = 20$;

— raportul de transmitere se determină ca un număr cu cît mai multe zecimale (minim două zecimale), situație în care aceiași doi dinți se vor angrena după un număr mare de rotații ceea ce diminuează uzura angrenajului;

— alegerea dinților înclinați sau drepți se face în funcție de viteza periferică a pinionului $v_p = \frac{\pi \cdot 2r_p \cdot n}{60}$, unde $2r_p = mz_2$ și $n$ este turația nominală a motorului; pentru $v_p < 12$ m/s se aleg dinți drepți, pentru $v_p > 12$ m/s se aleg dinți înclinați.

Raportul de transmitere:

$$u = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{R_d}{r_p} = \frac{Z_1}{Z_2} = \text{const.},$$

arată de cîte ori este mai mare turația pinionului față de a coroanei.

Razele cercurilor primitive se deduc cu relațiile cunoscute:

$$R_d = \frac{Z_1 m}{2}; \qquad r_p = \frac{Z_2 m}{2}.$$

*Calculul de rezistență.* Forța $F_z$ la care se dimensionează dantura se deduce din forța de tracțiune la obadă a unei osii limitată de aderența $F_0$ (aceasta este condiția cea mai defavorabilă de solicitare):

$$F_0 = G_0 \varphi; \qquad F_0 \frac{D_0}{2} = F_z \cdot R_d.$$

Rezultă:

$$F_z = G_0 \varphi \frac{D_0}{2R_d}, \text{ în cazul transmisiei unilaterale,} \tag{1}$$

în care:

$F_z$ este forța pe dinte, în kg;

$G_0$ — sarcina pe o osie, în kg;

$\varphi$ — coeficientul de aderență la demaraj, a cărui valoare depinde de tipul de locomotivă ($\varphi = 0{,}35 \ldots 0{,}45$);

$D_0$ — diametrul roții motoare;

$R_d$ — raza cercului primitiv al roții mari dințate.

Dimensionarea dintelui se face considerîndu-l ca o grindă încastrată la un capăt, solicitată la încovoiere, de către forța $F_z$ aplicată la celălalt capăt.

Solicitarea la încovoiere a dintelui se determină cu relația

$$\sigma_i = \frac{q \cdot \cos^2\beta \cdot K_u}{\pi \cdot m \cdot y \cdot K} \text{ kg/cm}^2, \tag{2}$$

în care:

$q$ este sarcina repartizată liniar pe dinte $\left(q = \frac{F_z}{b}\right.$, unde $b$ reprezintă lățimea activă a dintelui în cm), în kg/cm;

$\beta$ — unghiul de înclinare pentru roțile cu dinți înclinați ($\beta = 0$ pentru roțile cu dinți drepți), în grade;

$m$ — modulul în secțiunea normală a dintelui;

$y$ — coeficientul de formă al dintelui, care se alege din tabelul 7.1;

$\frac{K_u}{K} = 1$ este raportul dintre coeficientul de încărcare la încovoiere și coeficientul de încărcare la întindere.

*Tabelul 7.1*

**Coeficientul de formă y pentru unghiul de înclinare al dinților de 20°**

| $z/\cos^2\beta$ | Dinți conducători | Dinți conduși | $z/\cos^2\beta$ | Dinți conducători | Dinți conduși |
|---|---|---|---|---|---|
| 16 | 0,088 | 0,112 | 32 | 0,108 | 0,135 |
| 17 | 0,089 | 0,113 | 35 | 0,113 | 0,140 |
| 18 | 0,090 | 0,114 | 37 | 0,116 | 0,144 |
| 19 | 0,091 | 0,115 | 40 | 0,120 | 0,149 |
| 20 | 0,092 | 0,117 | 45 | 0,124 | 0,155 |
| 21 | 0,094 | 0,118 | 50 | 0,128 | 0,159 |
| 22 | 0,096 | 0,120 | 60 | 0,134 | 0,164 |
| 24 | 0,098 | 0,122 | 80 | 0,140 | 0,172 |
| 26 | 0,10 | 0,124 | 100 | 0,144 | 0,177 |
| 28 | 0,102 | 0,127 | 150 | 0,148 | 0,187 |
| 30 | 0,105 | 0,131 | | | |

Ținînd seamă de expresia lui $q$ și considerînd $\frac{K_u}{K} = 1$, ultima relație devine:

$$\sigma_i = \frac{E_z \cdot \cos^2 \beta}{b \cdot \pi \cdot m \cdot y}. \tag{3}$$

Cum lățimea dintelui are expresia:

$$b = \psi_0 \cdot m,$$

în care:

$\psi_0$ este coeficientul de lățime al dintelui (la transmisiile pentru locomotive $\psi_0 = 10 \ldots 12$).

$m$ — modulul,

$$\sigma_i = \frac{F_z \cdot \cos^2 \beta}{\pi \cdot m^2 \cdot \psi_0 \cdot y}. \tag{4}$$

Dacă se ia în considerare în această relație în loc de $\sigma_i$ rezistența admisibilă la încovoiere $\sigma_{ai}$ și dacă se adoptă lățimea dintelui $b$ sau coeficientului $\psi_0$, se poate determina modulul $m$, cu relația:

$$m = \sqrt{\frac{F_z \cdot \cos^2 \beta}{\sigma_{ai} \cdot \pi \cdot \psi_0 \cdot y}}. \tag{5}$$

Cunoscînd modulul $m$, lățimea dintelui rezultă:

$$b = \frac{F_z \cos^2 \beta}{\pi \cdot m \cdot y \cdot \sigma_{ai}}. \tag{6}$$

Pinionul se face de obicei cu 5—10 mm mai lat decît coroana pentru a uşura montarea.

Rezistenţa admisibilă la încovoiere $\sigma_{ai}$ este:

$$\sigma_{ai} = \frac{\sigma_0}{n \cdot K_\sigma}, \tag{7}$$

în care:

$n$ este coeficientul de siguranţă (în cazul prelucrării mecanice de calitate $n = 1{,}5 \ldots 2$);

$\sigma_0$ — limita rezistenţei la oboseală a materialului la solicitare într-un singur sens, care poate fi determinată în funcţie de limita rezistenţei la oboseală la cicluri alternative $\sigma_{-1}$:

$$\sigma_0 = \frac{2\sigma_{-1}}{1 + \frac{\sigma_{-1}}{K_\sigma \sigma_b}}, \tag{8}$$

în care:

$K_b$ este coeficientul de concentrare a tensiunilor;

$\sigma_b$ — limita de rezistenţă la întindere ($\sigma_r \geqslant 7\,500$ kg/cm$^2$).

Valoarea rezistenţei $\sigma_{-1}$ se poate determina cu relaţia:

$$\sigma_{-1} = 0{,}25\,(\sigma_b + \sigma_s) + 500 \text{ kg/cm}^2, \tag{9}$$

$\sigma_s$ fiind limita de rezistenţă la curgere ($\sigma_s \geqslant 5\,500$ kg/cm$^2$).

Distribuţia tensiunilor în secţiunea transversală a dintelui este arătată în figura 7.37.

În punctul de racordare la baza dintelui are loc o concentraţie a tensiunilor, datorită cărora distribuţia tensiunilor în secţiunea dintelui nu se face

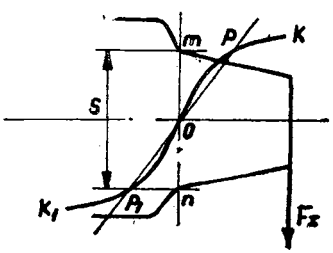



*Fig. 7.37.* Distribuţia tensiunilor în dinte.

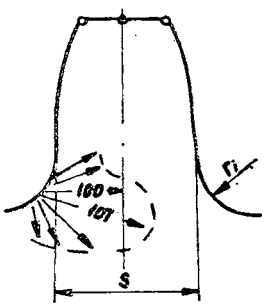



*Fig. 7.38.* Distribuţia tensiunilor la baza dintelui.

după o dreaptă $p\,p_1$, ci după o curbă oarecare $kOk_1$. Cea mai mare tensiune ce va acţiona va fi superioară tensiunii $mp$ obţinută fără a ţine seamă de concentrarea tensiunilor.

Raportul acestor tensiuni poartă numele de coeficient de concentrație al tensiunilor și trebuie luat în calculul de rezistență al dintelui.

Coeficientul de concentrație se determină prin metode optice, obținîndu-se o distribuție ca în figura 7.38.

La baza dintelui, coeficientul de concentrație $K_\sigma$ se poate determina cu relația:

$$K_\sigma = 0{,}9\ \alpha, \tag{10}$$

$\alpha$ fiind coeficientul teoretic de concentrație:

$$\alpha = 1 + 0{,}15\frac{s}{r_t}. \tag{11}$$

$$\left(\text{Pentru calcule se poate lua } \frac{s}{r_t} = 4\right).$$

**7.4.3. Verificarea angrenajului la uzură.** Influența uzurii se poate defini și exprima prin coeficientul de uzură $\varepsilon_u$:

$$\varepsilon_u = \frac{F_z \cdot v_z}{b \cdot \tau \cdot z} \cdot \frac{1}{m}, \tag{12}$$

în care:

$F_z$ este efortul pe dinte, în kg;

$v_z$ — viteza periferică a dintelui, în m/s;

$z$ — numărul de dinți;

$b$ — lățimea dintelui, în cm;

$m$ — modulul;

$\tau = 1{,}5 \ldots 1{,}9$ — gradul de angrenare.

$$v_z = \frac{V_u}{3{,}6}\left(1 - \frac{2h}{D_0}\right) \text{ m/s}, \tag{13}$$

în care $V_u$ este viteza unionară a locomotivei, în km/h, iar $h$ — garda la sol a angrenajului.

În funcție de $v_z$ și $\varepsilon_u$ calculați, din diagrama din fig. 7.39 se alege materialul pentru confecționarea pinionului și a roții mari dințate.

Diagrama din figura 7.39 este indicată pentru cazul unei transmisii rigide și al unei acționări unilaterale.

În ipoteza adoptării unei acționări rigide bilaterale, valoarea lui $\varepsilon_u$ calculată se reduce cu 10 ... 15%.

În ipoteza că sistemul adoptat de acționare este elastic (pinioane sau roți dințate cu coroană elastică) valoarea lui $\varepsilon_u$ se reduce cu 10 ... 15%, iar materialul se alege tot din diagrama din figura 7.39.

Calculul efectuat cu relațiile (12) și (13) este acoperitor, întrucît $F_z$ și $V_z$ nu apar niciodată simultan și pot rezulta valori pentru $\varepsilon_u$ care să depășească mult cadrul diagramei din figura 7.39. În această situație se recal-

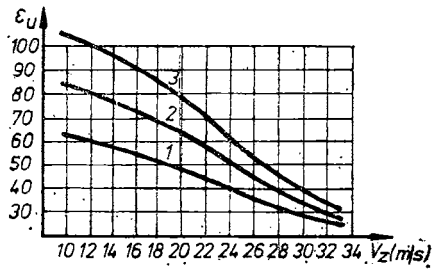



*Fig. 7.39.* Diagrama materialelor pentru angrenaje: *1* — curba limită pentru OL-carbon; *2* — curba limită pentru OL-aliat cu Ni; *3* — curba limită pentru OL aliat — Cr și Ni.

culează $v_z$ însă nu pentru $V_u$, ci pentru $V_u = 10$ km/h care este în domeniul demarajului și se recalculează și $\varepsilon_u$ pentru $v_z$ rezultat.

7.4.4. **Calculul randamentului transmisiei.** Pentru regimul uniorar, randamentul se poate calcula cu expresia:

$$\eta_t = 1 - \pi \cdot f\left(\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2}\right)\frac{\tau}{2}, \tag{14}$$

în care:

$z_1$, $z_2$ reprezintă numărul de dinți ai roților dințate;

$\tau$ — gradul de angrenare;

$f$ — coeficientul de frecare ($f = 0{,}14$ pentru electromotorul complet suspendat; $f = 0{,}15$ pentru electromotorul semisuspendat).

Pentru calculul orientativ al randamentului se mai poate folosi și relația:

$$\eta_t = 1 - 6\mu\left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}\right);$$

$\mu = 0{,}06$ coeficient de frecare.

7.4.5. **Exemplu de calcul al unui angrenaj de locomotivă**

Date de calcul:

— acționarea osiei . . . . . bilaterală, sistem elastic

— sarcina pe osie . . . . . $G_0 = 20$ t;

— diametrul roții motoare . . . . . $D_0 = 1\,200$ mm;

— viteza unionară a locomotivei . . . . . $V_u = 36$ km/h

— garda la sol . . . . . $h = 150$ mm.

Conform recomandărilor, dacă se adoptă $m = 10$ și $z_2 = 20$ dinți (v. fig. 7.36)

$$R_d = \frac{D_0}{2} - h = \frac{1200}{2} - 150 = 450 \text{ mm}.$$

$$R_d = R_e - h' = 450 - 0{,}5 \cdot 10 = 445 \text{ mm}.$$

$$h' = \gamma'_m = 0{,}5 \cdot 10 = 5.$$

$$z_{1\,max} = \frac{2(R_e - h')}{m} = \frac{2(450 - 0{,}5 \cdot 10)}{10} = 89 \text{ dinți}.$$

Raportul de transmisie:

$$u = \frac{z_{1\,max}}{z_{2\,min}} = \frac{89}{20} = 4{,}45.$$

Forța maximă pe dinte, conform relației (1)

$$F_z = G_0 \cdot \varphi \cdot \frac{D_0}{2\,R_d} = 20\,000 \cdot 0{,}33 \frac{1\,200}{2 \cdot 445} = 8\,900 \text{ kg}.$$

Pentru acționare bilaterală

$$F_2 = \frac{8\,900}{2} = 4\,450 \text{ kg}.$$

Solicitarea dintelui, conform relației (3):

$$\sigma_i = \frac{F_z \cdot \cos^2 \beta}{b \cdot \pi \cdot m \cdot y} = \frac{4\,450 \cdot 1}{10 \cdot 3{,}14 \cdot 1 \cdot 0{,}092} = 1\,540 \text{ kg/cm}^2.$$

S-au adoptat dinți drepți, deci $\beta = 0$,

$$b = \psi_0 \cdot m = 10 \cdot 1 = 10 \text{ cm}.$$

Pentru pinion, conform tabelului, pentru

$$z/\cos^2 \beta = \frac{20}{1} = 20,$$

rezultă $y = 0{,}092$ (pinionul este elementul conducător).

Rezistența admisibilă a dintelui, conform relației (7):

$$\sigma_{ai} = \frac{\sigma_0}{n \cdot K_\sigma} = \frac{5\,660}{2 \cdot 1{,}44} = 1\,970 \text{ kg/cm}^2;$$

$$\sigma_0 = \frac{2\sigma_{-1}}{1 + \frac{-1}{K_b\,\sigma_b}};$$

$$\sigma_{-1} = 0{,}25\,(7\,500 + 5\,500) + 500 = 3\,750 \text{ kg/cm}^2.$$

Se adoptă:

$$\sigma_b = 75 \text{ kg/mm}^2;\ \sigma_s = 55 \text{ kg/mm}^2;$$

$$K_\sigma = 0{,}9\alpha = 0{,}9 \cdot 1{,}6 = 1{,}44;$$

$$\alpha = 1 + 0{,}15\frac{s}{r_i}.$$

Se adoptă:

$$s/r_i = 4;$$

$$\sigma_0 = \frac{2 \cdot 3\,750}{1 + \frac{3\,750}{1{,}44 \cdot 7\,500}} = 5\,660 \text{ kg/cm}^2;$$

S-a adoptat $n = 2$.
În consecință:

$$\sigma_{ai} > \sigma_i.$$

Verificarea la uzură se face folosind relațiile (12) și (13):

$$\varepsilon_u = \frac{F_z v_z}{b \cdot \tau \cdot z}\,\frac{1}{m}.$$

Pentru pinion:

$$v_z = \frac{V_u}{3{,}6}\left(1 - \frac{2h}{D_0}\right) = \frac{36}{3{,}6}\left(1 - \frac{2 \cdot 150}{1\,200}\right) = 7{,}5 \text{ m/s}.$$

Adoptăm $\tau = 1{,}5$.
Cunoscînd:

$$z_2 = 20 \text{ dinți};\ m = 10;\ r_p = \frac{z_2 \cdot m}{2} = 100 \text{ mm};\ r_e = r_p + \gamma'_m =$$

$$= 100 + 1{,}5 \cdot 10 = 115 \text{ mm}.$$

Rezultă:

$$\varepsilon_u = \frac{4\,450 \cdot 7{,}5}{10 \cdot 1{,}5 \cdot 20} \cdot \frac{1}{10} = 1{,}11.$$

Acționarea fiind bilaterală,

$$10\% \times 11 = 11; \quad \varepsilon_u = 100.$$

Sistem elastic

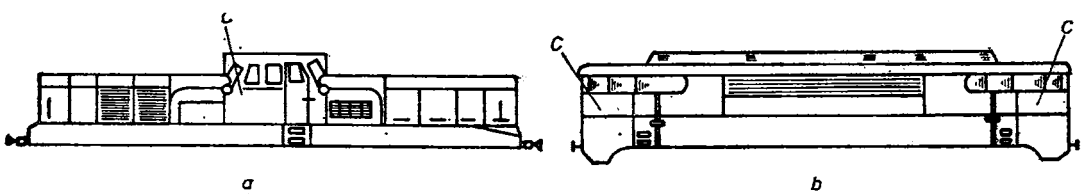
$$25\% \times 100 = 25; \quad \varepsilon_u = 75.$$

Pentru coordonatele $\varepsilon_u = 75$ și $V_z = 7{,}5$ m/s rezultă în diagrama din figura 7.39 un punct deasupta curbei *1*, ceea ce înseamnă că se recomandă pentru pinion material din oțel aliat cu Ni.

Pentru roata mare dințată, cu $z_1 = 89$ dinți, se obține pentru $\varepsilon_u$ o valoare mult mai mică decît în cazul pinionului, ceea ce conduce la a indica pentru construcția ei oțel-carbon.

## 7.5. CUTIA

7.5.1. **Tipuri constructive.** Ca soluție generalizată, cutia locomotivelor electrice este unică, iar aspectul exterior a îmbrăcat numeroase forme de la originea tracțiunii electrice. După amplasamentul cabinei de conducere distingem două tipuri de cutii: cutie monocabină (fig. 7.40, *a*) și cutie bicabină (fig. 7.40, *b*).




*a* *b*

*Fig. 7.40.* Tipuri de cutie: *a* — monocabină; *b* — bicabină.

În varianta monocabină, aceasta este situată la milocul cutiei, iar din considerente de vizibilitate a semnalelor și asigurării uneij vederi panoramice impune reducerea dimensiunilor cutiei de o parte și de alta a cabinei în sensul creării unor capote joase și strîmte care să adăpostească echipamentul. Această soluție prezintă avantajul existenței unei singure cabine de conducere și deci un singur echipament de comandă, însă are inconvenientul că impune dispunerea aparatajului de înaltă și joasă tensiune în capote, trebuie create platforme exterioare de o parte și alta a capotelor pentru acces la echipament și necesită un spor de cablaj. În prezent această soluție este folosită numai la unele locomotive de putere mică destinate pentru manevră.

Dispoziția clasică și cea mai răspîndită este cutia cu două posturi de conducere simetrice la cele două capete ale cutiei. Cele două cabine sînt reu-

nite prin două culoare (de regulă) de comunicație, iar echipamentul se dispune în compartimentul central. Această soluție prezintă maximum de vizibilitate, însă are și unele inconveniente legate de dublarea echipamentului de comandă, în caz de tamponări frontale securitatea mecanicului este mai redusă și costul cutiei mai ridicat.

Extremitatea cutiei poate avea forme foarte variate, care au evoluat în timp în sensul de a ține pas cu „moda" impusă de imperativul vitezei mereu crescînde.

Cu referire la modul de construcție al cutiei, în figura 7.41 și figura 7.42 sînt prezentate două soluții după care sînt realizate locomotivele de construcție recentă.

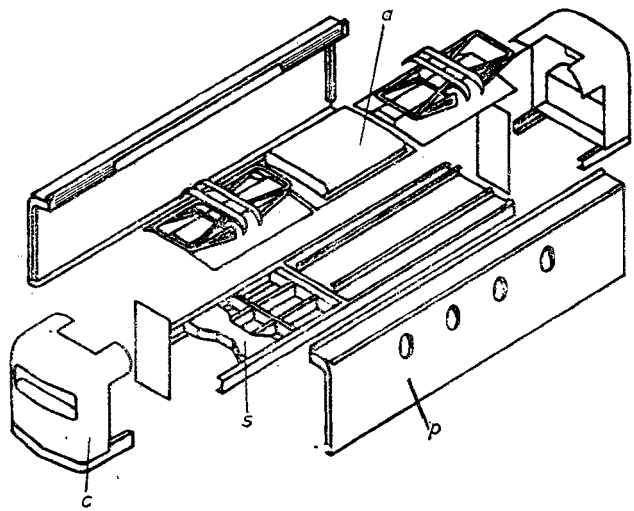



*Fig. 7.41.* Cutie portantă; *s* — șasiu; *c* — cabine; *p* — pereți laterali; *a* — acoperiș (panou demontabil).

*Cutia portantă* (figura 7.41), adică întreg ansamblul (șasiu, pereții laterali și acoperișul) concură la asigurarea rezistenței. Cele șase subansamble parțiale formate din tole ambutisate la rece se asamblează prin sudură. În acoperiș se prevede un panou demontabil pentru introducerea și scoaterea echipamentului voluminos, în compartimentul central.

*Cutie cu șasiu portant* (fig. 7.42) la care șasiul este elementul de rezistență și este alcătuit din tole sudate, iar caroseria din tablă subțire este montată prin sudură pe șasiu. Subansamblele principale sînt indicate în figura 7.42. Această soluție prezintă avantajul că oferă acces ușor la echipament, de asemenea suprastructura situată deasupra șasiului este ușor demontabilă și conduce la o ușurare sensibilă a construcției mai ales cînd se utilizează și folosirea materialelor plastice (înlocuitori) la dublarea pereților laterali, uși etc.

7.5.2. **Ventilarea cutiei.** Ventilarea cutiei forțată a motoarelor de tracțiune, redresoare, selfuri de aplatisare, rezistențe de frînare, răcitorul transformatorului ... necesită un debit important de aer (poate atinge 20 m³/sec).

Circuitele de ventilație sînt studiate astfel ca pierderile hidraulice să fie reduse și să evite pătrunderea de picături de apă, zăpadă și praf. Satisfacerea acestor condiții impune, după dispoziția circuitelor de ventilație, crearea unei presiuni, sau depresiuni în interiorul cutiei.

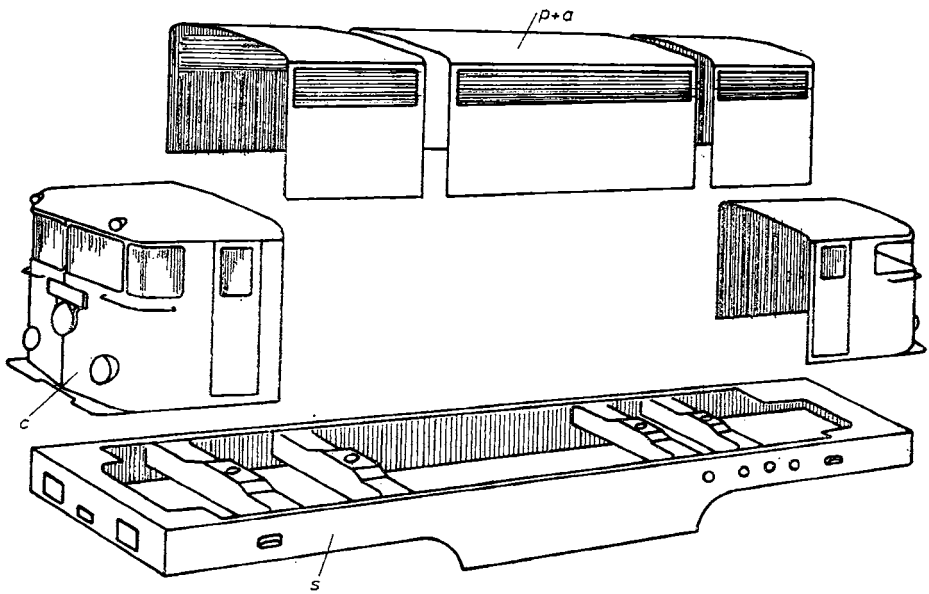



*Fig. 7.42.* Cutie cu șasiu portant (semnificația notațiilor este aceeași ca la fig. 7.41).

Un exemplu de cutie „în presiune" este dat în figura 7.43 unde se observă că aerul pentru ventilare este aspirat din exteriorul cutiei prin orificii practicate la partea superioară și refulat prin canale (conducte) la echipamentul ce trebuie răcit și parțial în interiorul cutiei pe care o pune astfel sub o ușoară presiune, datorită căreia se evită intrarea apei, zăpezii sau prafului în interior. Soluția prezintă inconvenientul că necesită o instalație voluminoasă de priză a aerului.

Majoritatea construcțiilor recente folosesc un dispozitiv mai simplu prin care se pune interiorul cutiei în depresiune în raport cu presiunea exterioară (atmosfera).

Soluția unei cutii „în depresiune" este redată în figura 7.44. Aerul este aspirat din exterior în cutie prin intermediul unor deschideri de secțiune mare practicate în pereții laterali. Deschiderile de aspirație trebuie să aibă secțiune mare pentru ca viteza aerului la admisie să fie mică (3—4 m/s) și ca depresiunea în cutie să fie de asemenea mică (de ordinul 6—10 mm. col. apă). Pentru a împiedica pătrunderea prafului, picăturilor de apă, ... deschiderile de aspirație practicate în pereții laterali se amplasează la partea superioară, în afara zonelor de turbulență vecine solului și sînt protejate cu jaluzele orizontale (persiene reglabile) și panouri filtrante (folii ondulate din material plastic găurite și disspue în șicane ...).

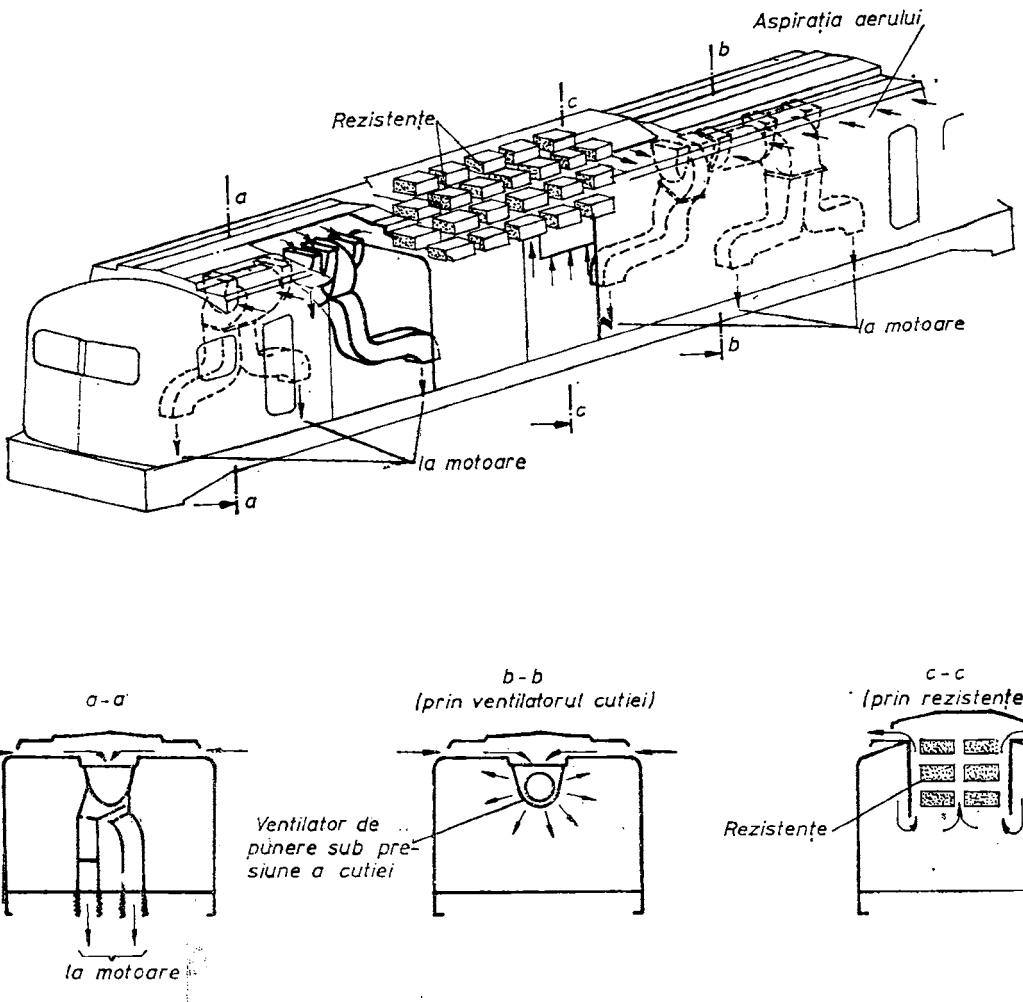



*Fig. 7.43.* Cutie în presiune.

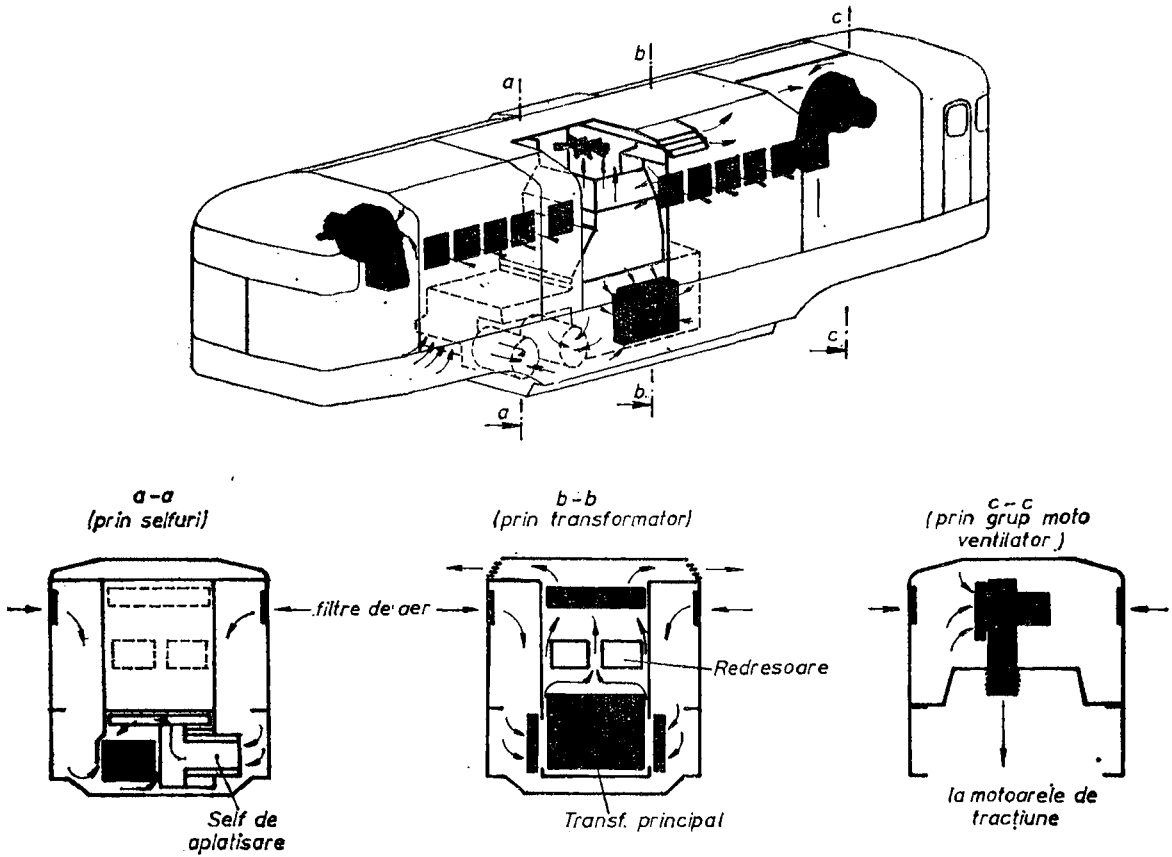



*Fig. 7.44.* Cutie în depresiune.

## 7.6. AMPLASAREA ECHIPAMENTULUI ȘI AMENAJAREA CUTIEI

7.6.1. **Condiții generale.** Așa cum s-a menționat, motoarele electrice de tracțiune se amplasează pe boghiurile locomotivei, iar restul echipamentului se dispune în cutie. Dispunerea echipamentului în cutie se face astfel ca să fie îndeplinite următoarele condiții:

— asigurarea echilibrării longitudinale și transversale a locomotivei, în vederea obținerii repartiției sarcinilor proiectate pe osii;

— satisfacerea exigențelor de accesibilitate la aparatajul și la utilajul ce necesită supraveghere;

— amplasarea aparatajului și a dulapurilor astfel încît lungimea cablurilor de forță și de control să fie minimă;

— plasarea ventilatoarelor cît mai aproape de elementele ce trebuie răcite forțat (motoare, rezistențe, radiatoare etc.), în scopul reducerii dimensiunii canalelor de ventilație și presiunii aerului de răcire;

— plasarea grupului transformator împreună cu accesoriile sale, care formează un bloc compact și este organul cel mai greu al locomotivei, în centrul locomotivei și dispunerea restului aparatajelor în jurul acestuia;

— executarea pereților și a acoperișului cutiei în dreptul blocului transformator, de obicei amovibili, aceste locuri neformînd partea de rezistență a cutiei, pentru a da posibilitatea demontării blocului trafo de pe locomotivă;

— crearea în sala mașinilor a două culoare laterale de acces (de preferință) dintre care unul pentru trecerea de la o cabină de conducere la alta, iar celălalt pentru vizitarea aparatajului, la care accesul să fie condiționat de înzăvorîri (în acest mod se simplifică dispunerea panourilor de protecție în condițiile cerințelor de tehnică a securității);

— gruparea echipamentelor cu același funcțional într-un bloc constructiv unitar (de exemplu: redresorul, scurtcircuitorul, ventilatorul ... ce deservesc un motor de tracțiune) și de asemenea gruparea echipamentului electric de execuție și comandă pe specific în dulapuri de echipamente;

— părțile aflate sub înaltă tensiune se protejează cu plase și panouri astfel ca să nu poată fi atinse de personalul locomotivei.

Pentru exemplificare, în figura 7.45 este redată schema de amplasare a echipamentului în cutia locomotivei 040—EC (CFR).

7.6.2. **Repartizarea greutății cutiei pe boghiuri.** Pe cele două boghiuri ale locomotivei, greutatea cutiei trebuie repartizată în mod egal. Deoarece diversele agregate nu sînt de greutate egală, iar poziția unora este impusă din necesități funcționale, pentru a se asigura încărcarea egală a celor două boghiuri se procedează în modul următor:

— se face o amplasare orientativ a echipamentului (pe cît posibil simetric), notînd greutatea $G_1, G_2, \ldots G_i$ considerată în centrul său de greutate și distanțele respective $l_1, l_2 \ldots l_i$ față de un punct de referință (acesta se consideră punctul de sprijin al cutiei pe boghiu-pivotul);

— se amplasează transformatorul $G_t$ (piesa cea mai grea) în centrul cutiei, la distanța $x$ față de reazem;

— cutia propriu-zisă se consideră ca o sarcină uniform repartizată, $q$.

În ansamblu cutia se consideră ca o grindă pe două reazeme (pivoții boghiurilor) avînd două console egale, încărcată cu sarcini concentrate și o sarcină uniform distribuită, ca în schema de calcul din figura 7.46.

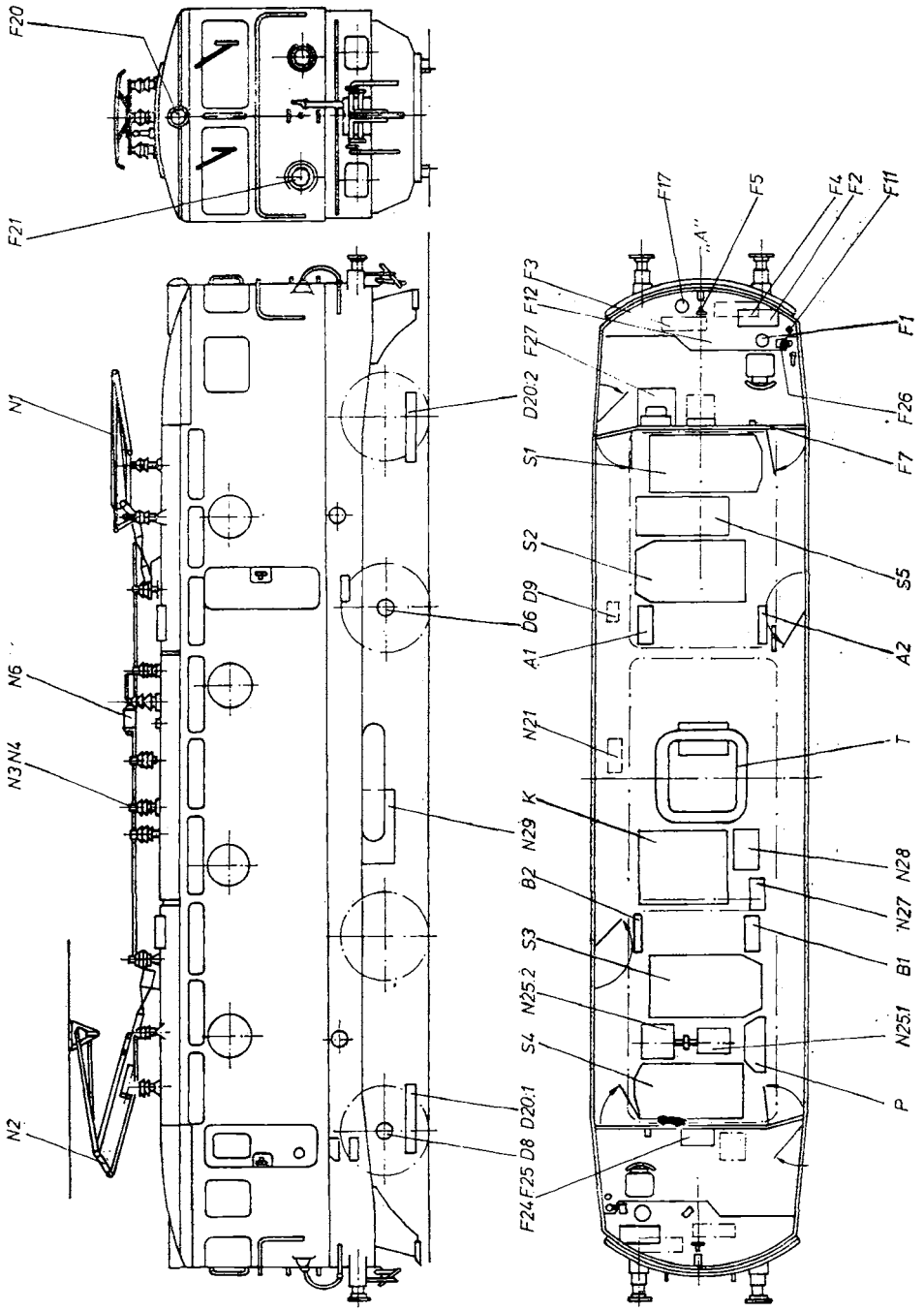



***Fig. 7.45.*** Dispoziția generală a echipamentului în cutia LE 040—EC : $A_1$, $B_1$ — bloc condensatoare și bobine reactanță ; $A_2$, $B_2$ — bloc condensatoare ; $F_1$ — controler ; $F_2$ — panou de instrumente ; $F_3$ — ușă cu echipament electric ; $F_4$ — panou de instrumente ; $F_5$ — ventilator de masă ; $F_7$ — buton de urgență ; $F_{11}$ — vitezometru ; $F_{12}$ — port-livret de mers ; $F_{17}$ — plită electrică ; $F_{25}$ — VACMA ; $F_{26}$ — butoane INDUSI ; $F_{27}$ — frigider ; $K$ — bloc răcire transformator ; $N_{25:1}$ — electrocompresor ; $N_{27}$ — cofret INDUSI ; $N_{28}$ — aparat încărcare baterii ; $P$ — bloc aparatură pneumatică ; $S_1$, $S_2$, $S_3$, $S_4$ — bloc aparate $MT_1$, $MT_2$, $MT_3$, $MT_4$ ; $S_5$ — bloc de aparate ; $T$ — bloc transformator.

Sarcina pe cele două boghiuri, ca ele să fie egal încărcate rezultă din proiecția forțelor pe verticală, adică:

$$R = \frac{q(2l + L) + \sum_{i=1}^{i=k} G_i + G_t}{2}. \qquad (1)$$

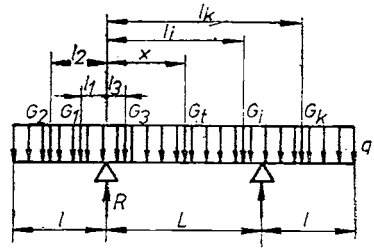



*Fig. 7.46.* Schema repartiției sarcinei cutiei pe boghiuri.

Ecuația de echilibru a momentelor față de pivotul de referință va fi:

$$-\frac{ql^2}{2} + \frac{q}{2}(L + l)^2 + \sum_{i=1}^{i=k} G_i l_i + G_t x - RL = 0. \qquad (2)$$

Înlocuind valoarea lui $R$ din ecuația (1) în relația (2) se determină cota $x$ la care trebuie amplasat transformatorul ($G_t$) pentru a satisface condiția egalei repartiții a sarcinii cutiei pe cele două boghiuri în sens longitudinal.

Printr-un raționament și calcul similar se face și egala repartiție a sarcinii în plan transversal, pentru a evita înclinarea cutiei în acest plan.

7.6.3. **Repartiția sarcinilor statice pe osii.** Prin proiectare, în scopul obținerii unei situații de echilibru al locomotivei și în plan longitudinal și îni plan transversal, trebuie să se asigure o egală repartiție a sarcinilor pe osii (repartiția longitudinală), iar la fiecare osie, o egală repartiție a sarcinii de pe osie pe cele două roți (repartiția transversală). Acest calcul de repartiție egală a sarcinilor pe osii și între roțile aceleiași osii este cîteodată denumit impropriu și echilibrarea statică longitudinală și transversală a locomotivei.

Considerînd un boghiu de locomotivă (fig. 7.47) pe care s-a repartizat corect jumătate din greutatea cutiei după metoda de mai sus (punctul 7.6.2) și figurînd sarcinile ce acționează asupra boghiului:

$P_c/2$ — greutatea cutiei ce revine boghiului (forța $R$ din figura 7.46);

$P_1$, $P_2$ ... $P_i$ — sarcinile concentrate situate la distanțele $x_1$, $x_2$ ... $x_i$ față de planul de referință;

$P_u$ — sarcina uniform repartizată a cadrului boghiului, considerată în centrul de greutate și situată la cota $x_u$;

$g_{01}$, $g_{02}$ ... sarcina nearcuită a osiei, poziționată la $a_1$, $a_2$ ...;

$G_{01}$, $G_{02}$ ... sarcina unei osii pe șină, cu distanțele $a_1$, $a_2$ ...

Luînd drept plan de referință traversa frontală a boghiului (de exemplu), egala repartiție a sarcinilor statice pe osii este asigurată prin ecuația de momente:

$$\Sigma G_{0i} a_i = \Sigma g_{0i} a_i + \Sigma P_i x_i + \frac{P_c}{2} x_c + P_u x_u.$$

Dacă această egalitate nu este îndeplinită, atunci se poate acționa asupra amplasamentului sarcinilor concentrate sau asupra distanțelor dintre osii ($a_i$).

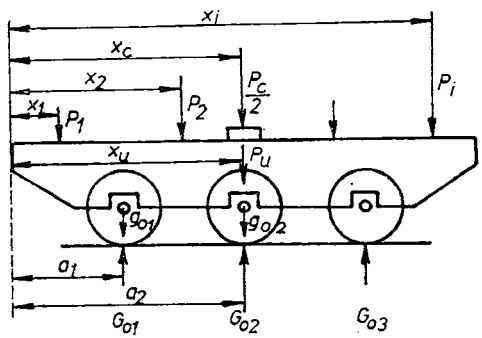



*Fig. 7.47.* Schema repartiției sarcinilor pe osii.

Aceeași metodă se aplică pentru a verifica repartiția sarcinilor pe lățimea locomotivei (transversal) pentru ca încărcarea statică a roților aceleiași osii să fie egală.

Uneori punctul de sprijin al cutiei pe boghiu (pivotul) nu poate fi amplasat în locul rezultat din calcul din cauza imposibilității de a plasa traversa crapodinei datorită suspensiei motorului de tracțiune. În asemenea situații pe boghiu se plasează două puncte de reazem, unul obișnuit și altul elastic (figura 7.48).

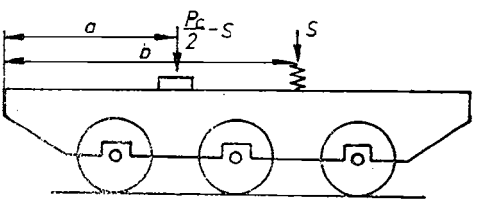



*Fig. 7.48.* Repartiția sarcinii cutiei pe boghiu prin două reazeme.

Păstrînd notațiile și semnificația lor din figura 7.48, sarcina preluată de reazemul $S$ rezultă din condiția de echilibru:

$$\left(\frac{P_c}{2} - S\right) a + Sb + \Sigma P_i x_i + \Sigma g_{0i} a_i = \Sigma G_{0i} a_i.$$

## 7.7. NOȚIUNI FUNDAMENTALE ASUPRA ADERENȚEI LA LOCOMOTIVELE ELECTRICE

7.7.1. **Considerații generale.** Ținînd seamă de stadiul și de tendințele actuale în transportul feroviar, mai ales în cazul tracțiunii electrice, unde s-a ajuns la instalări de puteri mari într-o locomotivă de greutate dată, la atelaje și cîrlig de tracțiune întărite și la tonaje de remorcat din ce în ce mai mari, problema aderenței, care limitează valoarea forței de tracțiune, capătă un aspect deosebit. Performanțele unei locomotive electrice sînt determinate de cele mai multe ori de aderență, mai ales în timpul demarajului și cîte o dată chiar în viteză, dacă este vorba de locomotivă de marfă.

Aceste elemente au condus la noi cercetări în ceea ce privește studiul părții mecanice și electrice a locomotivelor, în vederea sporirii aderenței.

Explicația fizică a aderenței este și astăzi o problemă încă controversată.

Două fenomene importante sînt de reținut în ceea ce privește explicarea aderenței:

— angrenarea rugozităților existente la corpurile metalice mai puțin bine polisate (cazul roții și șinei);

— legături interatomice între asperitățile rugozităților corpurilor în contact (roată/șină) realizîndu-se un fel de sudură între ele.

Acest al doilea fenomen de explicare a aderenței este agreat de fizicieni, însă atunci cînd se nisipează și aderența se ameliorează, primul fenomen este cel care explică aderența. Din punct de vedere feroviar, principiile fundamentale cu privire la contactul roată-șină se prezintă astfel:

Dacă unei roți sprijinite pe o șină și încărcate cu o sarcină verticală i se aplică o forță tangențială interzicînd deplasarea axului roții, deformațiile elastice ale materialelor în contact vor permite o ușoară învîrtire a roții, chiar dacă nu există o alunecare reală între cele două suprafețe.

De asemenea cînd se învîrtește o roată motoare, deși suprafețele de contact se schimbă în permanență, deformațiile elastice ale metalului roții și ale șinei produc o diferență între deplasarea liniară a centrului roții și parcursul real efectuat de un punct situat la periferia roții.

În aceste situații de funcționare, se spune că are loc o alunecare falsă, iar roata se consideră că este în aderență „statică" în raport cu șina.

Falsa alunecare poate dura pînă în punctul $A$ (fig. 7.49) unde forța transmisă, fără alunecare pură, este maximă.

Cînd viteza relativă între roată și șină depășește pe cea corespunzătoare falsei alunecări, se intră în zona de alunecare pură, care constituie patinarea și care are drept urmare nașterea unei forțe de frecare „dinamică" între roată și șină. Forța care se poate transmite în această situație descrește pronunțat în funcție de viteza de alunecare (fig. 7.49, zona alunecării pure).

Așa cum s-a menționat mai sus, coeficientul de aderență se definește ca raportul dintre forța tangențială maximă corespunzătoare stării statice și sarcina verticală a roții pe șină.

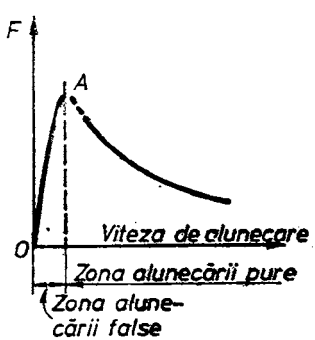



*Fig. 7.49.* Diagrama de definire a aderenței.

În zona alunecării dinamice, raportul dintre forța tangențială corespunzătoare și sarcina verticală pe osie definește coeficientul de frecare.

În condiții de laborator, cu două suprafețe de oțel perfect curate, aplicate una peste alta, se pot obține coeficienți de aderență ce pot atinge valori de ordinul 5.

În practică, în cele mai favorabile condiții posibile, coeficientul de aderență nu depășește valoarea 0,5.

În condiții normale de exploatare, pe suprafețele în contact (roată-șină) se găsesc diferite murdării (materii organice, oxizi metalici, straturi de gaze absorbite, materii grase etc.), care au o pronunțată influență dăunătoare, putînd conduce, în cazuri defavorabile, la valori ale coeficientului de aderență de 0,1 și chiar sub această valoare.

Se impun deci măsuri care să conducă la îmbunătățirea aderenței în condițiile normale ale exploatării.

În principal aceste măsuri se axează pe următoarele probleme:

— îmbunătățirea însăși a coeficientului de aderență roată-șină;

— măsuri constructive privind partea mecanică a locomotivelor;

— dispoziții convenabile ale părții electrice (în cazul particular al locomotivelor electrice și diesel-electrice).

7.7.2. **Îmbunătățirea coeficientului de aderență roată-șină.** S-a subliniat că în cazul unei șine murdare (grasă, umedă, oxidată etc.) aderența este foarte scăzută. Ameliorarea aderenței se poate face prin unul din următoarele procedee:

— sablarea (nisiparea) șinei;

— curățirea mecanică a șinei;

— curățirea electrică a șinei (prin scîntei electrice);

— aplicarea de diverse produse în locul nisipului.

Nisiparea este un procedeu vechi și aplicat curent în practică. Se fac cercetări și încercări în exploatare în vederea îmbunătățirii nisipării prin folosirea unor ejectoare speciale ce dirijează precis jetul de nisip în unghiul dintre roată și șină și de asemenea prin realizarea comenzii automate a nisipării cu ajutorul unor dispozitive de detectare, a patinării, ceea ce conduce și la o economie de nisip.

În stadiu de cercetare și experimentare se găsesc și unele dispozitive și procedee pentru curățirea mecanică sau electrică a șinelor. Așa, spre exemplu, s-a imaginat un dispozitiv mecanic instalat în partea din față a vehiculului, constînd dintr-un motor ce antrenează o perie de sîrmă rotativă care freacă șina și dintr-un suflător de aer uscat.

În stadiu de laborator se află încercări cu diverse procedee de curățire a șinei și a bandajelor prin scîntei electrice de înaltă frecvență, care au drept efect distrugerea corpilor străini de pe suprafețele acestora, precum și înlăturarea gazelor absorbite de straturile superioare ale metalului, care sînt de asemenea cauze ale micșorării aderenței.

O descărcare de înaltă tensiune creează o scînteie pilot. Această scînteie face conductor spațiul între un electrod și șină (sau roată) permițînd descărcarea unei surse de joasă tensiune. În acest mod s-au obținut coeficienți de aderență aproape totdeauna superiori lui 0,40 (cercetări și încercări la c. f. franceze — SNCF); valorile cele mai mici au fost mult ameliorate față de valorile obținute în mod normal. Analiza suprafețelor tratate prin scînte-

iere a arătat că procedeul nu a provocat modificarea în profunzime a structurii metalului șinei, chiar după un număr mare de treceri, însă materialul bandajului roții a arătat unele modificări.

De asemenea, au fost încercate pentru nisipare unele produse ca: praf de sticlă, film de ulei de silicon, carborundum ș.a.; acestea nu au dat însă rezultate mai bune ca nisipul.

*Perturbarea contactului roată-șină la înscrierea în curbă a osiilor.* Dacă se consideră coeficientul de aderență nu al unei singure roți ci a celor două roți motoare legate prin osie (deci o osie motoare), acesta variază după cum osia este în aliniament sau în curbă. În acest din urmă caz, dacă viteza de circulație în curbă diferă față de aceea pentru care s-a determinat suprainălțarea vor apărea cupluri de alunecare din cauza inegalității drumurilor parcurse de cele două roți pe firele respective de cale.

Considerînd cazul real că o osie nu circulă izolată, ci mai multe osii (2—3) sînt asamblate într-un boghiu, circulația în curbă a boghiului este însoțită de „ripare", indiferent de viteză. Acest fenomen este cu atît mai pronunțat cu cît ampatamentul boghiului (respectiv al locomotivei) este mai mare. Acest fenomen este cauza unei micșorări a aderenței în curbă.

*Influența părții mecanice asupra coeficientului practic de aderență.* În cazul locomotivelor cu boghiuri și al acționării individuale a osiilor, soluție aproape generalizată în construcția locomotivelor electrice, datorită cabrajului boghiului și cutiei, au loc pierderi de greutate aderentă de origine statică (vezi cap. 5).

Pentru diminuarea influenței cabrajului, se adoptă măsuri constructive corespunzătoare în realizarea părții mecanice a locomotivelor, ca spre exemplu „tracțiunea joasă", sau soluții ce obligă boghiurile să rămînă paralele cu șasiul cutiei.

În figura 7.50 se prezintă sintetic valorile pentru descărcarea osiilor la o locomotivă *B'o — Bo'*, în funcție de modul de suspensie a motorului de tracțiune (semisuspendat și suspendat) și de amplasarea acestuia în cadrul boghiurilor (orientate în opoziție sau în același sens). Pe figură s-au scris și expresiile descărcării osiilor pentru fiecare situație în parte.

Starea suprafeței șinei și aspectul static nu sînt singurii factori de luat în considerare, ci trebuie să se țină seamă și de o serie de alți factori, datorită cărora coeficientul de aderență roată-șină suferă importante variații, ca de exemplu:

— elasticitatea suspensiei datorită căreia, sub efectul șocurilor verticale, suprafața de contact se schimbă;

— influența greutății nesuspendate, sub efectul accelerațiilor verticale și al șocurilor laterale;

— calitatea și suprastructura căii;

— regularitatea suprafeței de rulare;

— curbele căii, cînd ele nu sînt parcurse cu viteza la care s-a dat suprainălțarea respectivă;

— mișcările de șerpuire, care provoacă o alunecare a roților ce se învîrtesc pe un diametru mai mare, reducînd astfel aderența;

— neregularitățile cuplului motor, avînd drept consecință apariția variațiilor bruște ale forței de tracțiune.

Influența acestor factori dinamici, care cresc cu viteza, face ca pentru o șină dată coeficientul de aderență să scadă pe măsură ce viteza crește.

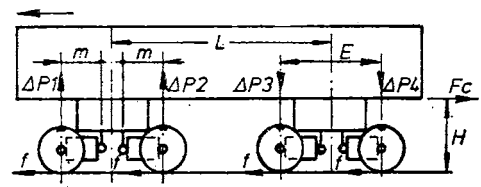
$$\Delta P1 = -\frac{FcH}{2L} - \frac{FcR}{4m}\left(1-\frac{E}{L}\right)$$

$$\Delta P2 = -\frac{FcH}{2L} + \frac{FcR}{4m}\left(1+\frac{E}{L}\right)$$

$$\Delta P3 = -\Delta P2$$

$$\Delta P4 = -\Delta P1$$

R - raza roții motoare



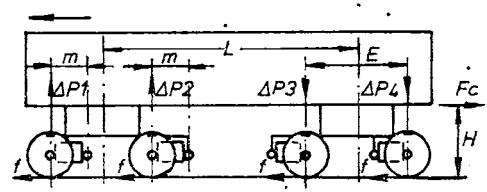

1

$$\Delta P1 = -\frac{FcH}{2L}$$

$$\Delta P2 = -\frac{FcH}{2L}$$

$$\Delta P3 = -\Delta P2$$

$$\Delta P4 = -\Delta P1$$



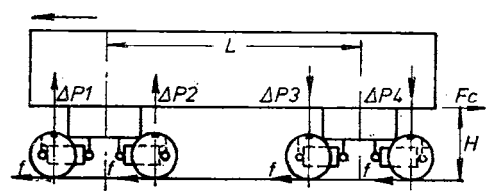

2

$$\Delta P1 = -\frac{FcH}{2L}$$

$$\Delta P2 = -\frac{FcH}{2L}$$

$$\Delta P3 = -\Delta P2$$

$$\Delta P4 = -\Delta P1$$



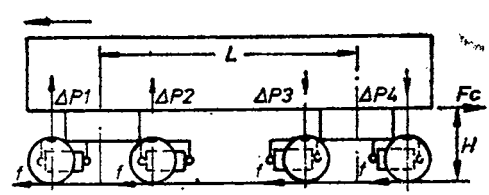

3

$$\Delta P1 = -\frac{FcH}{2L}$$

$$\Delta P2 = -\frac{FcH}{2L}$$

$$\Delta P3 = -\Delta P2$$

$$\Delta P4 = -\Delta P1$$




4

*Fig. 7.50.* Descărcarea osiilor în funcție de suspensia și poziția notoarelor de tracțiune în cadrul boghiului: *1* — motor semisuspendat și motoarele dispuse în opoziție; *2* — idem, și motoarele dispuse în același sens; *3* — motor suspendat și motoarele dispuse în opoziție; *4* — idem, și motoarele dispuse în același sens.

Măsurile constructive, care diminuează influența factorilor dinamici, se axează în general pe următoarele soluții:

— asigurarea unei mișcări verticale libere a osiilor, evitîndu-se ghidajul cutiilor de unsoare pe glisierele fălcilor de osie;

— reducerea greutății nesuspendate, care obligă la păsărirea motorului semisuspendat și la adoptarea motoarelor complet suspendate;

— asigurarea unei elasticități în sistemul de transmitere a cuplului de la axul motorului la osie;

— cuplarea osiilor prin angrenaje, care conduce la formula boghiului monomotor.

7.7.3. **Influența părții electrice asupra folosirii aderenței.** Schema electrică a unei locomotive intervine în primul rînd prin valoarea mai mare sau mai mică a variației forței de tracțiune între treptele de demaraj și este de subliniat că de forța de tracțiune maximă fără patinare ne apropiem cu cît această variație este mai mică.

Din acest punct de vedere locomotivele electrice de curent continuu sînt net inferioare celor de curent alternativ unde se dispune de o serie de mijloace ce permit un reglaj aproape continuu al tensiunii aplicate la motorul de tracțiune.

De asemenea, partea electrică intervine și printr-un alt factor mai important și anume prin forma curbei care dă variația forței motoare aplicate la osia care patinează.

Și în privința influenței părții electrice asupra folosirii aderenței s-au făcut încercări și s-au obținut o serie de realizări în vederea îmbunătățirii utilizării aderenței, dar studiul acestei probleme continuă.

7.7.4. **Valori practice pentru coeficientul de aderență.** Toate cauzele enumerate și încă multe altele care influențează, variația coeficientului de aderență arată că valoarea coeficientului real de aderență nu se poate determina pe cale analitică. Adoptarea unei valori de calcul pentru $\varphi$ este totuși imperios necesară întrucît fără ea nu pot fi stabiliți parametrii de bază constructivi ai unei locomotive (greutatea aderentă, formula osiilor, sarcina pe osie, puterea etc.).

Pentru calcule practice se folosesc curbe ridicate experimental și formule empirice deduse din aceste curbe; de regulă generală curbele și formulele sînt valabile pentru anume tipuri de locomotivă care au format obiectivul cercetărilor.

Întrucît coeficientul de aderență este foarte mult influențat de starea suprafețelor șinelor, rezultatele măsurătorilor apar dispersate și deci nu se poate vorbi de o curbă a aderenței în funcție de viteză, ci de un domeniu în interiorul căruia se situează punctele obținute în condițiile variate ale stării șinelor. Din ansamblul punctelor ridicate se trasează curbele înfășurătoare superioară, inferioară, precum și o anumită curbă medie.

În figura 7.51 sînt redate curbele medii $\varphi = f(V)$ ridicate de *Curtius* și *Kniffler* pe baza a numeroase încercări cu locomotive electrice de curent alternativ monofazat 16 2/3 Hz, 15 kV de tipul 1 — $D_0$ — 1. Aceste locomotive au motoarele de tracțiune conectate în permanență în paralel, ceea ce reprezintă o situație favorabilă pentru aderență.

Pe baza curbelor din figura 7.5 1 s-au dedus formulele lui *Curtius* și *Kniffler* pentru determinarea valorii coeficientului de aderență, recomandate ca valabile pentru locomotivele electrice de curent alternativ, în general:

$$\varphi = \varphi_0 \frac{8 + 0{,}1\ V}{8 + 0{,}2\ V}, \text{ cu } \varphi_0 = 0{,}33$$

sau

$$\varphi = \frac{75}{V + 44} + 0{,}161.$$

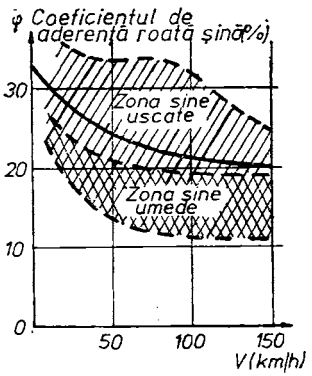



*Fig. 7.51.* Variația coeficientului de aderență după *Curtius-Kniffler.*

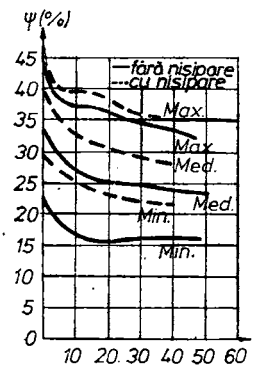



*Fig. 7.52.* Diagrama coeficientului de aderență, ridicată experimental, pentru LE — BoBo 12006 (de curent monofazat cu redresoare).

În figura 7.52 sînt prezentate curbele coeficientului de aderență, global, ridicate experimental, pentru o locomotivă $B_0 — B_0$ de curent monofazat 25 kV, 50 Hz, cu redresoare ignitronice și avînd acționarea osiilor individuală (locomotiva electrică $B_0 — B_0$ 12006 a căilor ferate franceze).

Din examinarea diagramei se poate face observația că nisiparea ridică simțitor curba inferioară, apropiindu-o de curba medie obținută fără nisipare. Dimpotrivă, curbele maxime cu și fără nisipare sînt foarte apropiate una de alta. Eficacitatea nisipării se face simțită în condițiile rele de aderență și nu în condiții bune de aderență unde efectul nisipării este neînsemnat.

Aceste rezultate arată că în exploatare este recomandabil a lua în considerare, la stabilirea tonajelor, curba medie fără nisipare, nisiparea servind la îmbunătățirea aderenței în condițiile șinelor rele și foarte rele. A nu nisipa ar conduce în practică la reducerea cu circa 30% a tonajelor remorcate.

Din cercetările făcute, rezultă că locomotivele cu boghiu monomotor au un coeficient de aderență ameliorat, față de cele cu acționare individuală a osiilor.

În figura 7.53 sînt prezentate rezultatele experimentale cu locomotive electrice de curent alternativ monofazat 50 Hz, cu ignitroane din seria $B_0—B_0$ 16500, ale S.N.C.F., cu boghiu monomotor.

Din examinarea diagramei se constată că valorile maxime ale coeficientului de aderență, fără nisipare, sînt de 0,45 la demaraj ($V = 0$) și de 0,4 la viteza de $V = 43$ km/h. Curba medie pleacă de la $\varphi = 0{,}35$ la demaraj și scade la $\varphi = 0{,}29$ la viteza $V = 50$ km/h.

Pe baza experimentărilor efectuate cu locomotivele electrice, în stadiul lor actual constructiv, în literatura de specialitate se recomandă formule variate de calcul al coeficientului de aderență.

Pentru locomotivele electrice de curent alternativ monofazat 50 Hz, 25 kV:

$$\varphi = 0{,}28 + \frac{8}{100 + 15.V}.$$

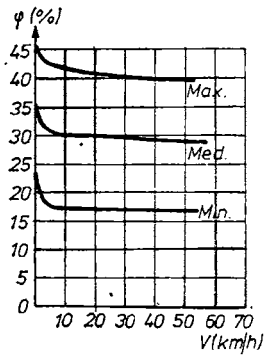



*Fig. 7.53.* Diagrama coeficientului de aderență, ridicată experimental, pentru LE—BB 16 500 cu boghiu monomotor (de curent monofazat cu redresoare).

Aceste locomotive au o dispoziție a echipamentului electric favorabilă pentru o bună aderență. Formula este recomandată în instrucțiunile de serviciu din 1.IX.1964 ale căilor ferate din U.R.S.S.

La multe administrații de cale ferată, inclusiv la C.F.R., pentru locomotivele electrice de curent monofazat cu redresoare, se folosește *formula lui Curtius-Kniffler.*

Pentru locomotivele electrice de curent continuu:

$$\varphi = \varphi_0 \frac{8 + 0{,}1 \cdot V}{8 + 0{,}2 \cdot V} \quad (\varphi_0 = 0{,}23 \ldots 0{,}18)$$

sau:

$$\varphi = 0{,}25 + \frac{8}{100 + 20 \cdot V}$$

(recomandată de instrucțiunile de serviciu din U.R.S.S. pentru locomotivele electrice cu dispozitiv de antipatinaj).

În perioada de demaraj și în regimul vitezelor mici, aceste locomotive au motoarele de tracțiune legate în serie, ceea ce reprezintă o situație defavorabilă pentru aderență.

În calcule, valoarea coeficientului de aderență, rezultat din formule sau din diagrame se recomandă a fi redus precum urmează:

— în rampe, la viteze peste 40 km/h, cu 10%;

— în curbe cu raze sub 400 m, cu 10%,

(în curbe cu raze sub 500 m, la căile ferate din U.R.S.S., prin instrucțiuni de serviciu, se recomandă pentru reducere aplicarea factorului de corecție $K_c = \frac{250 + 1{,}55.R}{500 + 1{,}1.R}$ unde $R$ este raza curbei),

— în tunelele cu lungimea de 0,3 ... 1 km, uscate și ventilate, cu 5%;

— în tunelele cu lungimea de 0,3 ... 1 km, neventilate, cu 10%;

— în tunelele cu lungimea peste 1 km, uscate și ventilate, cu 10%;
— în tunelele cu lungimea peste 1 km, neventilate, cu 15%.

7.7.5. **Influența caracteristicii de tracțiune, a alimentării și a reglării motorului de tracțiune asupra aderenței.** Motorul electric și modul de alimentare și de reglare a acestuia influențează partea electrică, determinînd calitățile diverselor tipuri de locomotive electrice, în special în cazul serviciului greu de marfă, legate de utilizarea aderenței, a capacității de demaraj și a coeficientului de aderență propriu-zis.

Schema electrică a unei locomotive influențează asupra valorii maxime și minime a forței de tracțiune, în perioada de demaraj; forța de tracțiune medie se apropie de forța maximă de tracțiune fără pericol de patinare, cu cît intervalul de variație dintre forța maximă și cea minimă de tracțiune este mai mic. Din acest punct de vedere, locomotivele de curent continuu sînt net inferioare celor de curent alternativ monofazat, întrucît la acestea din urmă se dispune de o serie de mijloace prin care se poate varia tensiunea la bornele motoarelor de tracțiune aproape în mod continuu.

Dacă limita de aderență a unei osii motoare este depășită dintr-un motiv oarecare, apare un început de alunecare care reprezintă un pericol atunci cînd alunecarea degenerează în patinare adică în ambalarea osiei motoare, care poate duce la distrugerea motorului de tracțiune. Dacă, după un început de alunecare, aceasta se resoarbe și osia se reprinde pe șină după o sporire de viteză $\Delta V$ nepericuloasă, pierderea momentană a aderenței nu are consecințe supărătoare. Problema esențială constă în a analiza fenomenele ce apar și consecința lor, din momentul cînd osia amorsează o alunecare, atît din punctul de vedere al forței de frecare roată-șină, respectiv al reacțiunii tangențiale a șinei în timpul alunecării, cît și sub aspectul forței exercitate de motor la obada roții în funcție de viteza sa.

Pentru o condiție de aderență dată, la viteza $V_1$, punctul $M$ reprezintă o funcționare fără alunecare (fig. 7.54).

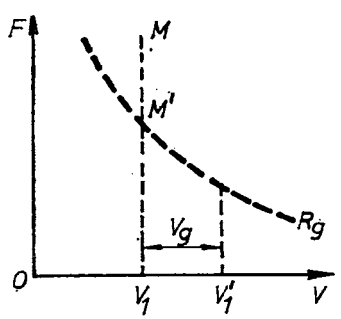


*Fig. 7.54.* Diagrama fenomenului alunecării roții pe șină.

Dacă din cauza unei scăderi locale a coeficientului de aderență $\varphi$ sau a unei creșteri a efortului motor la obadă, datorită trecerii la o treaptă superioară a controlerului de mers, osia motoare își pierde aderența, aceasta înseamnă, că reacțiunea tangențială $R_g$ exercitată de șină și care echilibra forța motoare devine brusc inferioară, ceea ce provoacă o alunecare a osiei.

Fenomenul și-a schimbat natura, în sensul că în acel moment coeficientul de aderență $\varphi$ devine coeficientul de frecare $f < \varphi$, iar reacțiunea tangențială va avea valoarea $R_g = f \cdot G_0$; $G_0$ fiind sarcina pe osie. În funcție de viteza de alunecare $v_g$, coeficientul $f$ și reacțiunea $R_g$ scad progresiv, după o anume curbă (figurată punctat).

Diferența $F - R_g$ are drept efect accelerarea maselor în mișcare de rotație legate de osie (osia, indusul motorului, transmisia), care sporesc viteza de alunecare $v_g$, iar viteza periferică totală a roții devine $V_1' = V_1 + V_g$.

Pentru a restabili aderența osiei va trebui să se revină înapoi cu un număr de trepte pînă se ajunge la o caracteristică de mers situată sub curba $Rg$. Rezultă că forma caracteristicii forței motoare în funcție de viteză $F_m(V)$ a motorului are o influență deosebită în privința restabilirii aderenței la o osie care patinează.

În figura 7.55, *a* s-a reprezentat ipoteza în care $F_m(V)$ este o curbă mai puțin căzătoare decît $R_g(V)$, iar în figura 7.55, *b*, cazul cînd caracteristica

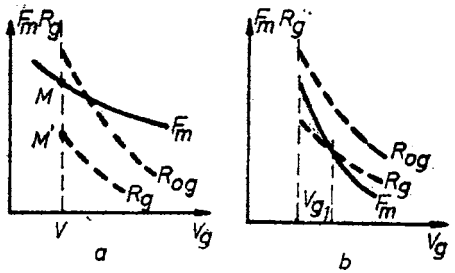



*Fig. 7.55.* Caracteristica forței motoare și reacțiunea tangențială a șinei: *a* — caracteristica forței motoare cu alură puțin căzătoare; *b* — caracteristica forței motoare cu alură pronunțat căzătoare.

motorului $F_m(V)$ este o curbă care cade mult mai repede decît reacțiunea tangențială a șinei $R_g(V)$.

În ipoteza unei caracteristici $F_m(V)$ ca în figura 7.55, *a* se observă că atunci cînd starea care a determinat curba $R_g$ se menține, $v_g$ crește încontinuu și alunecarea degenerează în patinare. Dacă starea de aderență se ameliorează revenind la cea inițială determinată de curba $R_{0g}$ patinarea nu mai poate fi oprită, întrucît nu mai există un punct de echilibru (punct de intersecție a celor două caracteristici pentru viteza $V$ considerată).

În ipoteza unei caracteristici $F_m(V)$ ca în figura 7.55, *b*, pronunțat căzătoare, un început de alunecare $R_g$ $(V)$ va întretăia o caracteristică $F_m(V)$ situată cu cîteva trepte de mers sub cea la care s-a amorsat alunecarea și echilibrul se va restabili pentru o viteză de alunecare $V_{g1}$. Dacă starea șinei revine la normal, curba $R_g$ va urca la $R_{0g}$, osia se va reprinde pe șină și începutul de alunecare este trecător și fără urmări practice.

Locomotivele de curent continuu care sînt echipate cu motoare serie și care au o caracteristică naturală $F_m(V)$ mai puțin căzătoare, în perioada de demaraj prezintă în mod frecvent riscurile de patinaj menționate. Acest lucru se datorește faptului că locomotiva demarează cu motoarele legate în serie și cu reostat în capul circuitului, prin urmare motoarele, nefiind electric independente se vor influența reciproc.

Turația motorului-serie, fiind $n \simeq \frac{U}{k \cdot \Phi}$, proporțională cu tensiunea, rezultă că motorul care patinează ($n$ crește) trage tensiunea asupra sa, ceea ce face ca tensiunea totală să nu se mai repartizeze în mod egal pe toate motoarele conexiunii serie. De asemenea, datorită tensiunii mari a motorului care patinează, pentru o aceeași putere, curentul absorbit va scădea și, cum motoarele sînt în serie, acest curent scăzut, dictat de motorul în patinare, va trece și prin motoarele osiilor care nu patinează și în mod automat cuplul acestora se va reduce ($M = k \cdot \Phi \cdot I$) și deci se va produce o cădere rapidă și importantă a forței de tracțiune a întregii locomotive în momentul patinării unei osii.

Deoarece curentul scade în motorul care patinează ($\Phi$ scade), aceasta atrage după sine creșterea în continuare a turației și în acest fel alunecarea amorsată degenerează în patinare, cu tendința de ambalare rapidă a motorului.

Reostatul fiind plasat în capul motoarelor legate în serie, demarajul se efectuează cu motoarele în serie și treaptă reostatică ceea ce are drept efect culcarea caracteristicii naturale a motorului (vezi fig. 2.40); această situație sporește tendința de patinare și ambalare a motorului.

Toate aceste fenomene care apar la amorsarea unei alunecări conduc în final la compromiterea demarajului și la obligația de a reveni repede pe primele trepte de mers pentru a găsi o caracteristică $F_m(V)$ pe care este posibil a întîlni caracteristica $R_g(V)$ pentru viteza de alunecare atinsă. De cele mai multe ori, această situație se regăsește pe primele trepte de mers.

La locomotivele a căror schemă electrică permite conectarea permanentă în paralel a motoarelor, deci și în perioada de demaraj și alimentarea sub tensiune constantă, în timpul unei patinări provocate de trecerea la o treaptă superioară de mers, motorul va păstra caracteristica naturală și va ajunge la un moment cînd, din cauza înclinării caracteristicii, în zona curenților mari forța motoare va egala forța rezistentă, adică motorul poate aluneca cu viteză constantă dar nu se poate ambala (fig. 7.56, *a*).

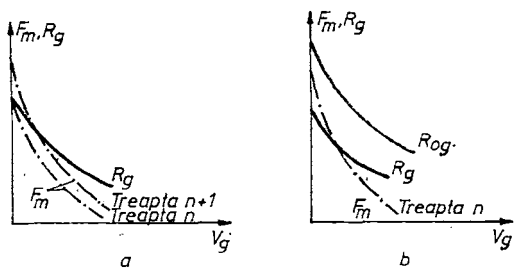



*Fig. 7.56.* Fenomenul patinării în cazul motoarelor cu caracteristici mecanice pronunțat căzătoare, conectate în paralel la demaraj și alimentate cu tensiune constantă; *a* — cazul patinării provocate de trecerea pe o treaptă de mers superioară; *b* — cazul patinării provocate de scăderea locală a aderenței.

Același lucru se întîmplă cînd patinarea provine dintr-o scădere locală a aderenței, pentru o treaptă de mers dată. Dacă se restabilesc condițiile de aderență inițiale, patinarea va dispărea de la sine (fig. 7.56, *b*).

În categoria locomotivelor cu schemă electrică favorabilă din punctul de vedere al aderenței intră în primul rînd cele de tip mono-continuu cu redresoare statice. La aceste tipuri de locomotive, osia care amorsează o patinare nu se asamblează, iar celelalte osii continuă să furnizeze în condiții normale forța lor motoare la obada roții.

În cazul locomotivelor de curent continuu cu schema clasică, așa cum s-a expus, este greu de sesizat limita de aderență, întrucît cea mai mică alunecare a unei osii degenerează în patinarea și respectiv ambalarea motorului, iar cuplul tuturor motoarelor scade, obligînd mecanicul să dea înapoi multe trepte de mers cînd observă patinarea. De aici și prudența în menținerea de eforturi de tracțiune reduse la obada roții.

Pentru a opri patinarea unei osii la o locomotivă de curent continuu este absolut necesar a interveni imediat după amorsarea alunecării, atunci cînd coeficientul de frecare roată-șină are o valoare încă suficient de ridicată și cînd energia cinetică cîștigată de motor nu a atins o valoare prea mare.

Micșorarea rapidă a forței motoare la o valoare inferioară reacțiunii tangențiale roată-șină, corespunzînd unei viteze de alunecare atinse, va permite reprinderea osiei care patinează. În acest scop au fost folosite dispozitive de antipatinare pneumatice, al căror principiu constă în aplicarea, cu o presiune potrivită, a saboților de frînă pe bandaje pentru a reduce forța motoare la obadă în momentul patinării. Această soluție nu a dat rezultate satisfăcătoare, întrucît acțiunea trebuia declanșată foarte rapid, lucru greu de obținut cu mijloacele de acționare pneumatice.

În construcțiile recente se recurge la soluții în care se acționează asupra cuplului motor și se urmărește menținerea formei pronunțat căzătoare a caracteristicii $F_m(V)$ în momentul patinării, prin folosirea de dispozitive electrice care au drept scop să detecteze osia ce amorsează o patinare și să intervină spre a opri această patinare.

*a. Dispozitive pentru detectarea patinării.* Pe unele locomotive electrice se folosesc pentru detectarea patinării relee diferențiale de tensiune pentru cazul conectării motoarelor în serie (fig. 7.57, *a*), și relee diferențiale de intensitate pentru cazul conectării motoarelor în paralel (fig. 7.57, *b*).

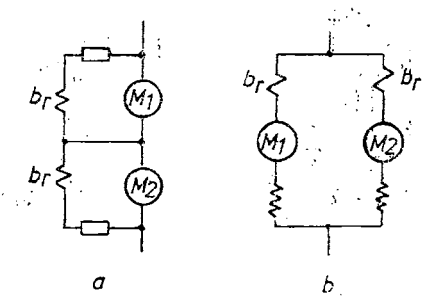



*Fig. 7.57.* Scheme pentru detectarea patinării: *a* — măsurarea diferențială a tensiunii în cazul motoarelor legate în serie; *b* — măsurarea diferențială a curenților, în cazul motoarelor legate în paralel; $b_r$ — bobina releului de detectare.

Rolul acestor relee este de a declanșa o semnalizare optică-acustică prin care avertizează mecanicul asupra patinării, sau de a aplica pe roată forțe de apăsare (frînare) reduse.

La unele tipuri de locomotive releele diferențiale provoacă și oprirea controlerului, în cazul celor prevăzute cu comandă automată. Soluția cu relee diferențiale nu dă totdeauna rezultate satisfăcătoare din cauză că nu semnalizează unele patinaje sau semnalizarea lor este tardivă.

De aceea au fost studiate și puse la punct dispozitive electronice mai sensibile, influențate direct de viteza osiilor, care au sensibilitate controlată pentru toată gama de viteze a locomotivei.

Schema de principiu a unui releu electronic tranzistorizat instalat pentru două osii este redată în figura 7.58.

Acest dispozitiv cuprinde două alternatoare tachimetrice $A$ montate cîte unul pe fiecare osie sau pe motoarele osiilor, care furnizează o tensiune proporțională cu viteza. Acest curent este redresat în curent continuu în punțile redresoare $E_1$ și $E_2$. Atîta vreme cît viteza de rotație a celor două osii este egală, vor fi egale și tensiunile la borne și deci nu poate apărea un curent de circulație (un semal). Cînd unul din alternatoare dă o tensiune mai mare (osia respectivă patinează), va apărea un curent de circulație $i$ (un semnal), care este amplificat prin tranzistoare și va da o comandă la bobina unui releu $R_s$. La rîndul său, acesta declanșează sistemul de evitare a patinării.

*b. Mijloace pentru evitarea patinării.* Așa cum s-a menționat, obiectivul este de a reduce rapid forța motoare la obadă sub valoarea reacțiunii tan-

gențiale în momentul amorsării alunecării, pentru a evita degenerarea în patinare. Pentru a fi eficace, intervenția trebuie să aibă loc într-un interval de timp de ordinul 0,2 ... 0,3 s.

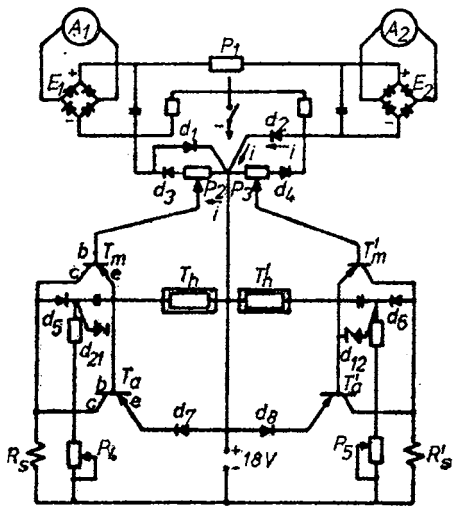



*Fig. 7.58.* Schema de principiu a unui releu electronic pentru detectarea patinării, prin măsurarea diferențială a vitezelor : $A_1$, $A_2$ — alternatoare ; $E_1$, $E_2$ — punți redresoare ; $P_1 \dots P_5$ — potențiometre ; $d_1 \dots d_8$ — diode ; $T_m$, $T'_m$, $T_a$, $T'_a$ — tranzistoare (*b* — baza, *c* — colector, *e* — emiter) ; $T_h$, $T'_h$ — termistor ; $R_s$, $R'_s$ — relee pentru transmiterea comenzilor.

Micșorarea forței motoare se poate obține prin diverse metode electrice. După reprinderea osiei ce patinează se restabilește schema inițială. De asemenea, simultan cu aplicarea schemei de evitare a patinării, trebuie comandată și o retrogradare automată cu una sau două trepte de mers, astfel ca, după reprindere, forța motoare să fie inferioară celei la care s-a amorsat alunecarea, evitînd astfel o nouă patinare.

În figura 7.59 este reprezentată schema unui dispozitiv de antipatinare folosit curent la locomotivele de curent continuu. Funcționarea acestei scheme se bazează pe șuntarea indusului la conexiunea serie și inserarea unui reostat-talon la conexiunea paralel.

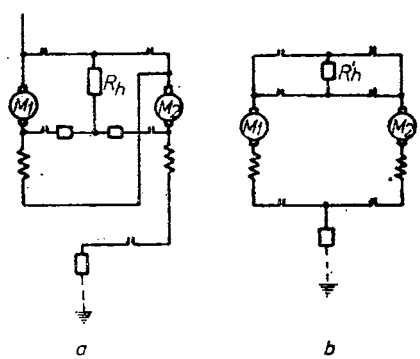



*Fig. 7.59.* Schema unui dispozitiv de antipatinare : *a* — șuntarea indusului la conexiunea serie ; *b* — reostat talon în capul motoarelor, la conexiunea paralel ; $R_h$ — reostat ; $R'_h$ — reostat talon.

Metoda șuntării indusului motorului se aplică la conexiunea serie și serie-paralel a motoarelor. Cînd se șuntează indusul motorului care patinează pe o rezistență se produc două efecte: curentul din indus deviază parțial prin șunt, ceea ce diminuează cuplul ($C = k \cdot \Phi \cdot I$), respectiv forța motoare la obadă, iar curentul în inductor se menține practic constant, ceea ce imprimă caracteristicii $F_m(V)$ o alură de derivație, adică pronunțat căzătoare. Cu alte cuvinte exact ceea ce se urmărește pentru antipatinare.

Șuntul indusului trebuie să intervină din momentul cînd motorul începe să alunece, lucru care se obține automat prin sistemul de detectare a patinării.

Rezistența de șuntare trebuie să aibă o valoare suficient de mare pentru a evita un inconvenient ce poate apărea în ipoteza unei valori mici a reostatului. În timpul patinării turația crește și odată cu ea și forța contraelectromotoare ($E_c = k \cdot n \cdot \Phi$). Dacă în acest moment se închide indusul pe o rezistență de valoare redusă, mașina devine generator, curentul își schimbă sensul și motorul este stopat brutal.

În cazul motoarelor legate în paralel (fig. 7.59, *b*) pierderea aderenței la osiile unui boghiu se traduce prin creșterea tensiunii la bornele a două motoare, iar remediul constă în diminuarea rapidă a acestei tensiuni prin inserarea unui reostat-talon care are drept efect înăbușirea amorsării patinajului unui motor și diminuarea cuplului la celălalt.

În figura 7.60 este reprezentată o altă soluție de antipatinaj prin bare de echilibrare folosită la conexiunea paralel a motoarelor. Această soluție (fig. 7.60, *b*) se poate aplica și la locomotivele de curent monofazat.

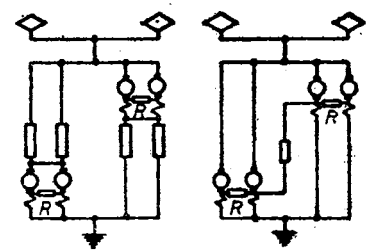



*Fig. 7.60.* Schema de antipatinare prin bare de echilibrare : *a* — conexiunea paralel cu treaptă reostatică ; *b* — conexiune paralel fără reostat.

Bara de echilibrare constă în legarea indusurilor, pe partea spre inductor, printr-o rezistență *R*. Această soluție se aplică la conexiunea paralel a motoarelor și are drept efect că, la amorsarea unui patinaj, cîmpul motorului în chestiune este menținut într-o oarecare măsură de curentul celuilalt sau al celorlalte motoare. Bara de echilibrare rămîne montată în permanență în circuit nu ca în soluția din figura 7.59, cînd rezistențele se elimină din circuit la dispariția patinării.

Din cauza valorii mici a rezistenței înfășurării de excitație $r_e$, rezistența barei de echilibrare și a conexiunilor ei poate introduce un oarecare dezechilibru între curenții celor două inductoare. Din acest motiv valoarea rezistenței barei de echilibrare rezultă sensibil egală cu aceea a inductorului motorului, astfel că se evită curenții de dezechilibru între motoare la regimul normal de funcționare dacă apar diferențe de caracteristici între motoare, sau în cazul cînd diametrele roților motoare sînt diferite.

Pentru antipatinare, pe locomotivele de curent continuu de construcție recentă se aplică la conexiunile serie și serie-paralel metoda șuntării indusului (fig. 7.57), iar la conexiunea paralel metoda barei de echilibrare (fig. 7.60).

7.7.6. **Dispozitivul de antipatinare al LE-060-EA (CFR).** Schema de principiu este redată în figura 7.61 unde s-au păstrat notațiile din documentația locomotivei.

Părțile componente și modul de funcționare sînt următoarele:

— șase transformatoare diferențiale de curent (S7.45: 1 ... S7.45: 6) cîte unul pentru fiecare motor și un transformator pentru curentul mediu

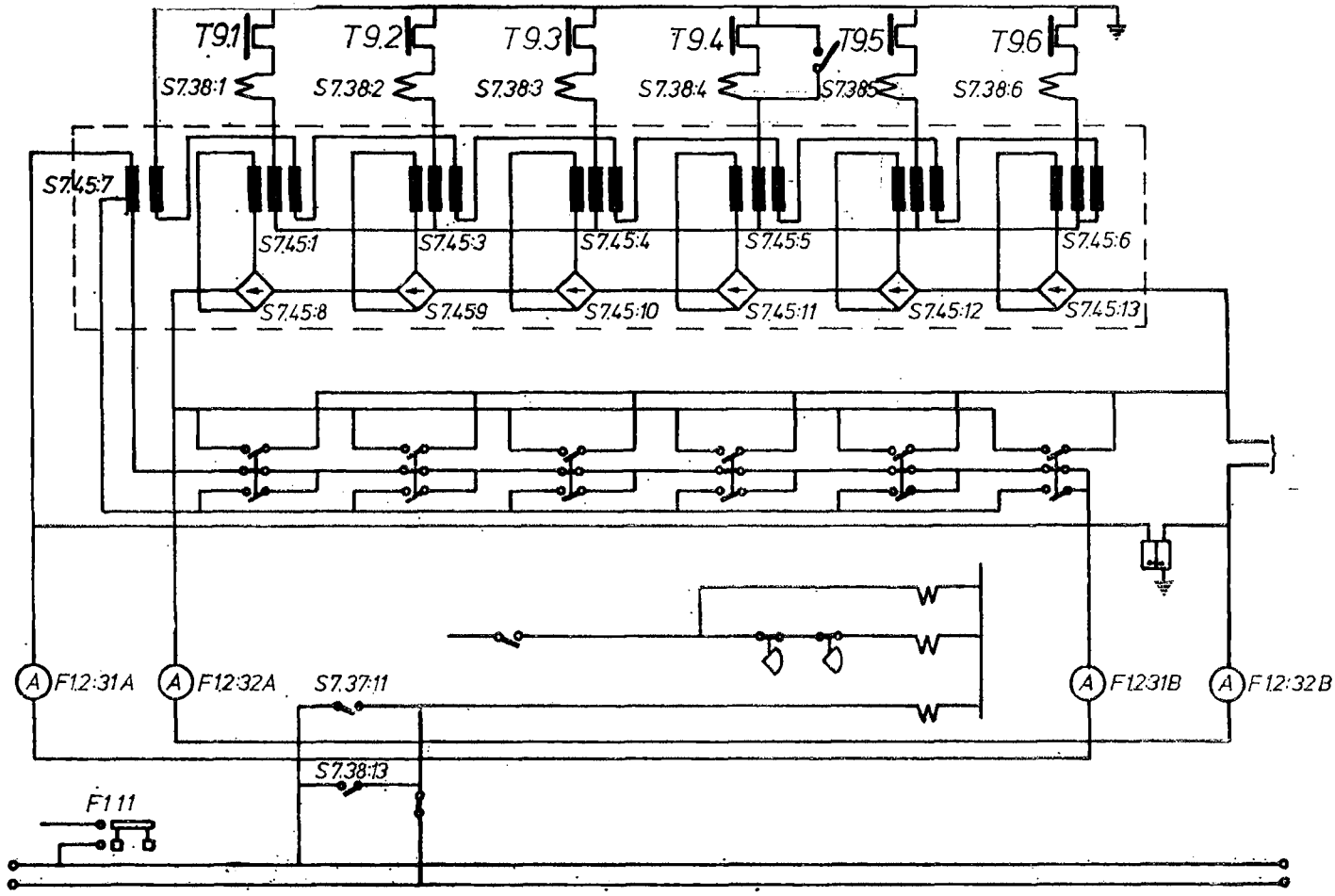



*Fig. 7.61.* Schema de principiu a dispozitivului de antipatinare al locomotivei electrice 060—EA (CFR).

(S7.45: 7) cu raport de transformare 35/5 A și care mai are o priză intermediară pe înfășurarea de 5A la care raportul de transformare devine 25/5 A.

— șase punți de redresare (S7.45: 8 ... S7.45: 13) pentru 9V/0,12 A c.c.

— dispozitivul, de mai sus, primește impulsuri de curent pentru măsurat de la transformatoarele de curent (T9.1 ... T9.6) ale motoarelor de tracțiune. Aceste impulsuri de măsurat se adună în cele șase transformatoare diferențiale de curent, iar în transformatorul curentului mediu (S7.45: 7) suma impulsurilor de măsurat este divizată la 6, rezultînd astfel valoarea medie a curentului motoarelor de tracțiune. Ampermetrele (F.1.2: 31 A... F1.2: 32 B) din cabinele mecanicului sînt legate la înfășurarea secundară a transformatorului de curent (S7.45: 7) și deci, măsoară valoarea medie a curentului motoarelor de tracțiune.

— Cînd unul din motoarele de tracțiune patinează, impulsurile de curent ce se primesc iau valori diferite, ceea ce face ca în a treia înfășurare a transformatorului diferențial al motorului care patinează să se producă un curent, deoarece numărul amperspirelor ale celor două înfășurări nu sînt egale față de cel al celei de-a treia; acest curent este redresat în punțile de redresare ale dispozitivului și este sesizat de ampermetrele F1.2: 32 care măsoară „diferența curentului motoarelor".

Impulsul diferenței curentului trece spre amplificatorul de relee (S7.37:1 — nefigurat în schemă) care dă comandă de retrogradare a graduatorului, la supapele electropneumatice ce declanșează frîna cu aer comprimat (aplică saboții pe roțile osiei ce patinează) și la supapele electropneumatice ale nisiparelor.

În schemă mai sînt cuprinse o serie de elemente suplimentare care asigură funcționarea corectă a dispozitivului și pentru situațiile cînd un motor de tracțiune este deconectat sau cînd locomotiva lucrează în regim de frînă electrică reostatică.

# Capitolul 8

# TRENURI ELECTRICE AUTOMOTOARE

## 8.1. CONSIDERAŢII GENERALE

Spre deosebire de locomotiva electrică, definită ca un vehicul motor electric de cale ferată, destinată să remorcheze vagoane şi care conţine numai echipamentele energetice, deci fără posibilitatea de a avea şi încărcătură utilă, în tracţiunea electrică feroviară mai există şi o altă categorie de vehicule motoare electrice destinate în exclusivitate satisfacerii traficului de călători (au şi echipament şi primesc şi sarcină utilă) şi care la noi, pînă în prezent, nu a căpătat o denumire unitară şi generalizată. Realizarea acestora se poate face în diverse variante constructive:

— Vagon motor electric, care conţine şi echipamentul şi are şi spaţii pentru călători;

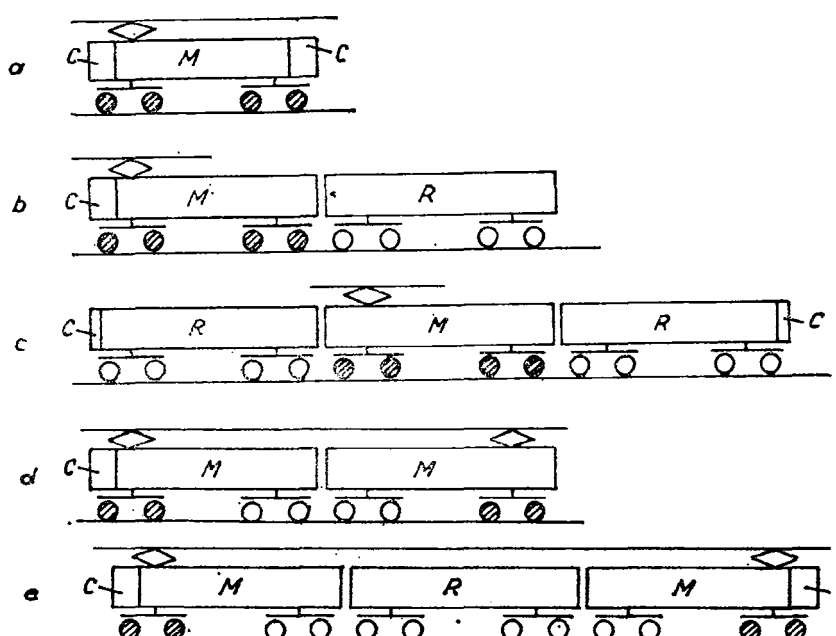



*Fig. 8.1.* Scheme de compunere a ramelor electrice şi trenurilor electrice automotor: *M* — vagon motor; *R* — remorcă; *C* — cabină de conducere: *a*—vagon motor electric; *b*— unitate de tracţiune (secţie); *c*— rămă electrică; *d* — unitate de tracţiune; *e* — rămă electrică.

— Unitate de tracțiune (secție), care formează cel mai mic ansamblu autonom indivizibil în exploatare. Poate fi alcătuită dintr-un vagon motor + una remorcă (aceasta poate primi și o parte din echipament) cu o singură cabină de conducere la un capăt. Pentru circulația în sens invers unitatea trebuie întoarsă;

— Rama electrică reprezintă ansamblul de unități de tracțiune (vagon motor sau unități de tracțiune în sensul de mai sus) în compunere fixă și reversibilă din punct de vedere a circulației, adică dispuse de cabine de conducere la ambele capete și nu mai necesită a fi întoarsă la punctele terminus ale secției;

— Tren electric automotor reprezintă gruparea mai multor rame electrice, sau o ramă electrică avînd la mijloc intercalată o secție ..., sau alte grupări după necesități momentane, însă obligatoriu reversibil.

În figura 8.1 s-a prezentat schematic cîteva variante de compunere a vagoanelor motor și remorci în scopul realizării de rame electrice (*RE*), sau trenuri electrice automotor (*TEA*).

În ceea ce privește numărul osiilor motoare, acesta depinde de puterea necesară instalată și puterea motorului de tracțiune, de destinația ramei (pentru trafic suburban, sau *TEA* de lung parcurs), de greutatea aderentă necesară ... Ca idee orientativă, pe figura 8.1 osiile motoare s-au figurat hașurat, iar variantele constructive reprezentate sînt realizări existente în exploatare.

## 8.2. NECESITATEA TRACȚIUNII ELECTRICE CU RAME SAU TRENURI ELECTRICE AUTOMOTOARE ȘI CONDIȚII TEHNICE IMPUSE ACESTORA

În multe țări dezvoltate din punct de vedere industrial, unde există tendința formării de centre industrial comerciale supraaglomerate a apărut și tendința de migrare a populației din aceste centre către împrejurimi formînd așa-zise orașe satelit (tendință urbanistică firească). De asemenea o bună parte din mîna de lucru a orașelor dezvoltate din punct de vedere economic este asigurată din localități vecine prin navetiști (este și cazul a multor orașe industriale din țara noastră).

Rezolvarea unui asemenea trafic de călători suburban, cu perspective de creștere continuă, din studii efectuate în multe țări, revine căii ferate prin folosirea de automotoare diesel în zonele neelectrificate, și de folosire a ramelor și trenurilor electrice automotoare în zonele electrificate.

Transportul suburban de persoane (navetiști și ocazionali) prezintă următoarele caracteristici specifice:

— distribuție neuniformă, cu descreștere progresivă de la centrul economic spre periferie;

— neuniformitate în cursul zilei, în sensul că dimineața densitatea este mare spre centru și după-amiaza în sens invers; impunînd în aceste momente posibilități sporite de capacitate, iar în restul zilei apare situația unei mobilități mai reduse privind acoperirea necesarului de transport a călătorilor din traficul suburban;

— variație săptămînală și sezonieră a traficului;

— curenți de trafic cu orientare opusă în zilele de odihnă față de cei din zilele de lucru;

— opriri dese (în cazul particular al rețelei CFR distanțele medii între stații sînt de ordinul a 5 km) și de scurtă durată.

O rezolvare corespunzătoare din punct de vedere tehnico-economic a traficului suburban, avînd caracteristicile prezentate mai sus, se poate face folosind rame și trenuri electrice automotoare, în cazul zonelor electrificate. Satisfacerea transportului suburban de persoane prin trenuri cursă sau trenurile de lung parcurs remorcate cu locomotive diesel sau electrice, pretutindeni s-a dovedit neeficient.

Printre avantajele mai importante pe care le oferă trenurile electrice automotoare se menționează următoarele:

— prin puterea instalată mare asigură accelerații și decelerații sporite ceea ce conduce la o viteză medie de circulație pentru trasee cu opriri dese, comparabilă cu a trenurilor accelerate și ca atare nu ostilizează trasele acestora în grafic;

— asigură capacități de transport sporite după necesități momentane de trafic, prin cuplarea mai multor unități de tracțiune; cu menținerea calitativă a parametrilor (accelerație, decelerație, viteză, timp de mers ...);

— consum de energie electrică optim, întrucît nu se transportă greutate inutilă; toate vagoanele sînt folosite pentru transportul călătorilor (inclusiv și vagoanele motor);

— sînt reversibile în ceea ce privește sensul de mers, nemainecesitînd manevre de întoarcere în stațiile terminus;

— în ipoteza prevederii cu comandă centralizată a deschiderii și închiderii ușilor de intrare în vagoane (soluție aplicată în mod frecvent) se scurtează timpul de staționare în stații și se sporește siguranța călătorilor;

— la defectarea unui vagon motor, nu se închide linia întrucît trenul electric automotor își poate continua mersul cu restul vagoanelor motor, bineînțeles cu o putere redusă corespunzător.

Ținînd seamă de specificul traficului suburban și de avantajele tehnico-economice pe care trebuie să le aducă ramele și trenurile electrice automotoare, în diverse țări (U.R.S.S., Polonia, R.F.G. ...), s-au elaborat studii din care au rezultat unele recomandări de care să se țină seama la construcția acestor tipuri de vehicule electrice, din care se menționează următoarele:

— posibilitatea de a face să varieze compunerea vagoanelor motor și a remorcilor, în scopul de a realiza trenuri electrice de lungimi (capacități) diferite, după necesitățile sezoniere de trafic;

— lungimea vehiculului ($l_{veh.}$), care depinde printre altele de sarcina admisă pe osie, condiții de circulație în curbă, confort, călători ... se poate stabili cu relația:

$$l_{veh} = \frac{G_{max}}{q_0 \cdot b},$$

$G_{max}$ este tara maximă a vagonului (t);

$b$ — lățimea admisă de gabarit (m);

$q_0$ — greutatea specifică de tară (tara vagonului pe suprafața orizontală a vehiculului: kg/m$^2$).

Construcțiile actuale de cutii din OL carbon au tara $q_0 = 850 \cdots 1\,000$ kg/m²; cele care folosesc și aliaje speciale (Al—Mg) ... $q_0 = 630$ kg/m²; folosirea de profile speciale, aliaje ușoare, înlocuitor din materiale plastice ... au permis coborîrea greutății unitare a cutiei cu 9% și respectiv tara vehiculului cu 1,5—2%.

Ca exemplificare, pentru un vagon motor cu o tară max. 64 t, lățimea admisă de gabarit $b = 3300$ mm., și cutie cu $q_0 = 800$ kg/m², rezultă $l_{veh} \simeq \simeq 24$ m.

Se recomandă pentru lungimea vehiculului ... 24 ... 25 m.

— Timpul de intrare și ieșire a unui călător de cca 1 s, impune construcția de 2—4 uși pe fiecare parte a vagonului (lățimea ușii simple 740 mm, pentru ușa dublă 1200 ... 1300 mm).

— Opririle frecvente și de scurtă durată, corelate cu realizarea de viteze tehnice medii mari impun:

- putere instalată mare;
- accelerații și decelerații mari, de ordinul ... 1 m/s²;
- frînă puternică (deci, înzestrată și cu frînă electrică);
- viteză maximă constructivă, în jur de 120 km/h.

— În scopul realizării unui coeficient de aderență mediu bun (de ordinul 0,2) și în condiții rele de aderență (șine umede) fără nisipare (se recomandă eliminarea nisiparelor pentru simplificarea construcției), este de recomandat ca toate osiile să fie motoare și vehiculul înzestrat cu instalație automată contra patinării.

— Raportul între locurile pe scaun și cele în picioare ... cca. 0,5; numărul locurilor în picioare 4 ... 5 călători/m².

— Nivelul de zgomot în vagon ... 70 ... 75 dB.

Se menționează că în unele țări industrializate, legarea centrelor urbane mari de metropolă care prezintă un trafic de călători regulat în perioade distincte ale zilei (dimineața spre metropolă, seara spre centrele urbane) se folosesc cu succes trenuri electrice automotoare de lung parcurs (trenuri intercity) de mare viteză și confort sporit, care trebuie să îndeplinească anumite condiții tehnice suplimentare (viteză mare 200 ... 250 km/h; confort sporit în sensul condiționării aerului și reducerea nivelului de zgomot; numărul locurilor șezînde mari; accelerația și decelerația nemaifiind necesar a fi ridicate, implică și includerea de vagoane remorcă în compunere și ca atare nu mai apare necesitatea tuturor osiilor motoare; putere instalată mare 2000 ... 8000 kW și deci puteri specifice ridicate 11 ... 25 kW/tf).

În tabelul 8.1 și 8.2 se prezintă caracteristici și performanțe tehnice ale unor rame electrice realizate în unele țări industrializate și țări democratice.

În ceea ce privește concepția tehnică actuală a ramelor electrice este de subliniat că ea diferă față de a locomotivelor din cauza specificului exploatării, adică viteza ridicată de mers și numărul mare de porniri și opriri impun mecanicului o mare concentrare în examinarea căii. De aceea este necesar, pentru a scuti mecanicul de unele operații suplimentare să se realizeze reglarea automată a regimurilor de pornire, de frînare electrică și parcurs.

Mecanicul stabilește numai regimul de mers (tracțiune sau frînare) și mărimea de referință (de exemplu viteza și accelerația impusă în cazul regimului de tracțiune, respectiv decelerația sau forța de frînare în timpul regimului de frînare), reglarea parametrilor făcîndu-se automat.

*Tabelul 8.1*

**Caracteristici şi performanţe tehnice ale ramelor electrice din ţări industrializate**

| ŢARA | ANGLIA | FRANŢA | R.F.G. | JAPONIA | SUEDIA | U.R.S.S. | JAPONIA | U.R.S.S. | R.F.G. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Tipul | Am 10 — (1966) | — | ET 420 | KU-MO-HA 591 | — | ER-9P | Prototip 951 | ER-200 | ET-403 |
| Anul fabricaţiei | 1969 | 1975 | 1971 | 1970 | 1967 | 1967 | 1972 | Proiect tehnic întocmit | 1973 |
| Componenţa vagoanelor | $M_c+M+M+M_c$ | $M_c+R+R+M_c$ | $M_c\times M+M_c$ | $M_c+R+M_c$ | $M_c+R$ | $R_c+M+R+M+M+R+M+R+M+R_c$ | $M_c+M_c$ | 2 vag. capăt forţă motoare + 12 vag. motoare | $M_c+M+M+M_c$ |
| Componenţa osiilor | $2(B'_0B'_0+B'_0B'_0)$ | $B'_0B'_0+2'2'+2'2'+B'_0B'_0$ | $B'_0B'_0+B'_0B'_0+B'_0B'_0$ | $B'_0+B'_0-B'_0+B'_0$ | $B'_0B'_0+2'2'$ | $5(2'2'+B'_0B'_0)$ | $B'_0B'_0+B'_0b'_0$ | $2'2'+12\ B'_0B'_0+2'2'$ | $B'_0B'_0+B'_0B'_0\ B'_0B'_0+B'_0B'_0$ |
| Viteza maximă (km/h) | 120 | 120 | 120 | 160 | 120 | 130 | 260 | 200 | 200 |
| Acceleraţia ($m/s^2$) | 0,9 | — | 0,9 | — | med. 06 max. 09 | 0,6 | — | 0,32—0,6 $m/s^2$ | 0,45—0,6 $m/s^2$ |
| Deceleraţia ($m/s^2$) | 0,9 | — | 0,9 | — | med. 0,9 | 0,8 | — | — | 0,9—0,95 |
| Puterea de durată (kW) | 1060 | — | 2400 | — | — | 3300 | 2000 | 10320 | 3840 |
| Puterea uniorară (kW) | — | 2360 | — | 880 | 1120 | 3500 | — | — | — |

*Tabelul 8.1. (continuare)*

| ŢARA | ANGLIA | FRANŢA | R.F.G. | JAPONIA | SUEDIA | U.R.S.S. | JAPONIA | U.R.S.S. | R.F.G. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Numărul motoarelor electrice de tracţiune | 16 | 8 | 12 | 8 | 4 | 5 | 8 | 48 | 16 |
| Diametrul roţii (mm) | 838 | — | 850 | — | 920 | M-1050<br>R-950 | 1000 | 850 | 1000 |
| Numărul total de locuri | — | 816 | 448 | — | 300 | 1575 | — | — | — |
| Numărul de locuri pe scaune | 273 | 364 | 194 | — | 196 | 1050 | 90 | 872 | 183 |
| Numărul de locuri în picioare | — | 452 | 254 | — | 100 | 525 | — | — | — |
| Lungimea ramei (m) | — | 92,33 | 67,4 | — | 49,55 | 201,5 | 51 | 365 | 109,22 |
| Greutatea totală fără călători (t) | 158<br>(1966) | — | 126,5 | 90 | 77,4 | 485 | | 850<br>17 t/este max | 238 |
| Putere specifică (kW/tf) | 6,7 | — | | | 14,5 | 7,4 | 25 | 11 | 16 |

Legendă:
$M_c$ — vagon motor cu cabină de conducere;
$M$ — idem, fără cabină de conducere;
$R_c$ — vagon remorcă avînd şi cabină de conducere;
$R$ — idem, fără cabină de conducere.

*Tabelul 8.2*

**Caracteristici şi performanţe tehnice ale ramelor electrice din unele ţări democratice**

| Numărul de ordine | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ţara | | U.R.S.S. | R. P. Bulgaria | Cehoslovacia | R. D. Germană | R.S.F. Iugoslavia | România |
| Anul fabricaţiei | | 1964 | 1970 | 1969 – 1970 | 1969 | 1970 | 1974/75 |
| Tipul | | ER-9P | ER-25 | SM 4880 | — | 410 | Re Prototip |
| Componenţa vagoanelor şi osiilor | | $R_c+M+R+M+$ $+R+M+R+$ $+M+R_c5(2'2'+$ $+B_0'B_0')$ | $R_c+M+M+R_c$ $2(2'2'+B_0'B_0')$ | $M_c+R+R+R+$ $+M_cBB+2'2'+$ $+2'2'+2'2'+$ $+BB$ | $M_c+M+M+M_c$ $2(B_0'B_0'+B_0'B_0')$ | $R_c+M+R_c$ $2'2'+B_0'B_0'+2'2'$ | $M_c+M+M+M_c$ $B_0'B_0'+B_0'B_0'+$ $+B_0'B_0'+B_0'B_0'$ |
| Felul tensiunii | | 25 kV, 50 Hz | 25 kV, 50 Hz | 25 kV, 50 Hz | 15 kV, $16\frac{2}{3}$ Hz<br>25 kV, 50 Hz | 25 kV, 50 Hz | 25 kV, 50 Hz |
| Viteza maximă (km/h) | | 130 | 130 | 110 | 120 | 120 | 120 |
| Ecartamentul (mm) | | 1524 | 1435 | 1435 | 1435 | 1435 | 1435 |
| Acceleraţia ($m/s^2$) | | 0,6 | — | 0,6 | 1,0 | 0,64 | 0,9 |
| Deceleraţia ($m/s^2$) | | 0,8 | — | — | 1,0 | — | 0,9 |
| Puterea uniorară (kW) | | $5 \times 720 = 3500$ | 1440 | 1860 | — | — | 2180 |
| Puterea durată (kW) | | $5 \times 660 = 3300$ | 1320 | 1680 | 3360 | 1180 | 1870 |
| Greutatea (t) | fără călători | $R_c-49$<br>485<br>R—37,M—59,2 | 210 | — | 180 | M-57,5<br>126,5<br>R —34,5 | |
| | cu călători | — | — | 295 t | — | 155 | 272 |

*Tabelul 8.2 (continuare)*

| Numărul de ordine | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Țara | | U.R.S.S. | R.P. Bulgaria | Cehoslovacia | R. D. Germană | R.S.F. Iugoslavia | România |
| Lungimea automotorului sau trenului (m) | | 201,6 | — | 122,5 | 98,1 | 73,7 | 98 |
| Lungimea vagonului (m) | | 19,6 | 19,6 | — | 24,1 | — | 24,5 |
| Diametrul roții (mm) | | M-1050<br>$R_c$ și R-950 | — | — | 850<br>780 | — | 920 |
| Număr de locuri | pe scaune | $R_c$—88<br>1050<br>R-108,<br>M-110 | $R_c$—70<br>316<br>M-88 | 336 | $R_c$-78<br>328<br>M-86 | 228 | 348 |
| | în picioare | 525 | 134 | — | $R_c$-117<br>480<br>M-123 | — | 400 |
| Numărul total de locuri | | 1575 | 450 | — | 808 | 440 | 748 |
| Puterea specifică $\left(\frac{kW}{tf}\right)$ | | 7,4 | 6,6 | 6,8 | 18,6 | 9,5 | 8,2 |

Pentru reglarea acestor parametrii este necesară fie măsurarea lor directă, fie măsurarea unor mărimi electrice corespunzătoare din circuitul motoarelor de tracțiune (de exemplu curentul rotoric, tensiunea de alimentare a motoarelor de tracțiune etc).

De asemenea sistemul de comandă și reglaj trebuie să realizeze protecția la supracurenții rotorici și antipatinaj.

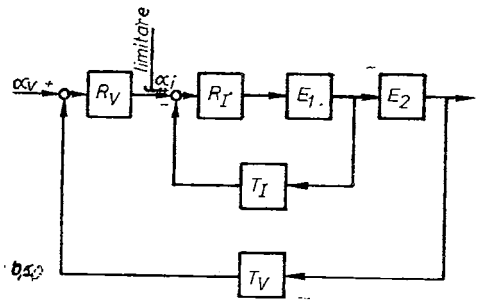



*Fig. 8.2.* Schema-bloc pentru reglarea vitezei TEA; $R_v$ — regulator de viteză; $R_i$ — regulator de curent rotoric; $E_1$, $E_2$ — elemente de execuție; $T_I$ — traductor de curent; $T_v$ — traductor de viteză; $V$ — viteza vehiculului; $I$ — curent rotoric; $\alpha_v$ — mărimea de referință corespunzătoare vitezei impuse; $\alpha_i$ — mărimea de referință corespunzătoare curentului rotoric impus.

În figura 8.2 este prezentată principial o schemă de reglaj utilizată în tracțiunea electrică.

Sistemul de reglare se compune în acest caz dintr-o buclă pentru reglarea vitezei și o buclă secundară pentru reglarea curentului rotoric. Elementul de execuție este în cazul general un redresor comandat cu tiristoare. Mărimea de ieșire din regulatorul de viteză reprezintă mărimea de referință pentru curentul rotoric.

Pentru a proteja motoarele de tracțiune, această mărime de referință este limitată superior.

În alte cazuri, în locul buclei pentru reglarea curentului se utilizează o buclă pentru reglarea accelerației.

Totodată, în cazul mai multor motoare de tracțiune comandate simultan trebuie să se ia măsuri împotriva patinării.

## 8.3. RAMA ELECTRICĂ SUBURBANĂ C.F.R.

Extinderea electrificării rețelei feroviare din țara noastră, care în prezent cuprinde magistralele rețelei (București — Brașov — Ciceu — Deda — Dej, București — Ploiești—Adjud, București—Craiova — Caransebeș — Timișoara — Arad, București — Constanța, Filiași — Simeria — Deva ...), impune introducerea în parcul C.F.R. și a celui de-al treilea mijloc de vehicul motor electric, adică rama electrică, pentru satisfacerea traficului suburban de călători (prima etapă a însemnat dotarea cu locomotive electrice tip *Co—Co* pentru traficul de marfă în principal, a doua etapă este marcată de introducerea locomotivelor electrice *Bo — Bo* în principal pentru traficul de călători). Institutului de Cercetări și Proiectări în Transporturi (ICPTT — MTTc) i-a revenit, prin planul de stat, sarcina realizării unei rame electrice prototip (model experimental pentru C.F.R.), de concepție proprie, cu folosirea de vagoane existente și adaptarea acestora. După încer-

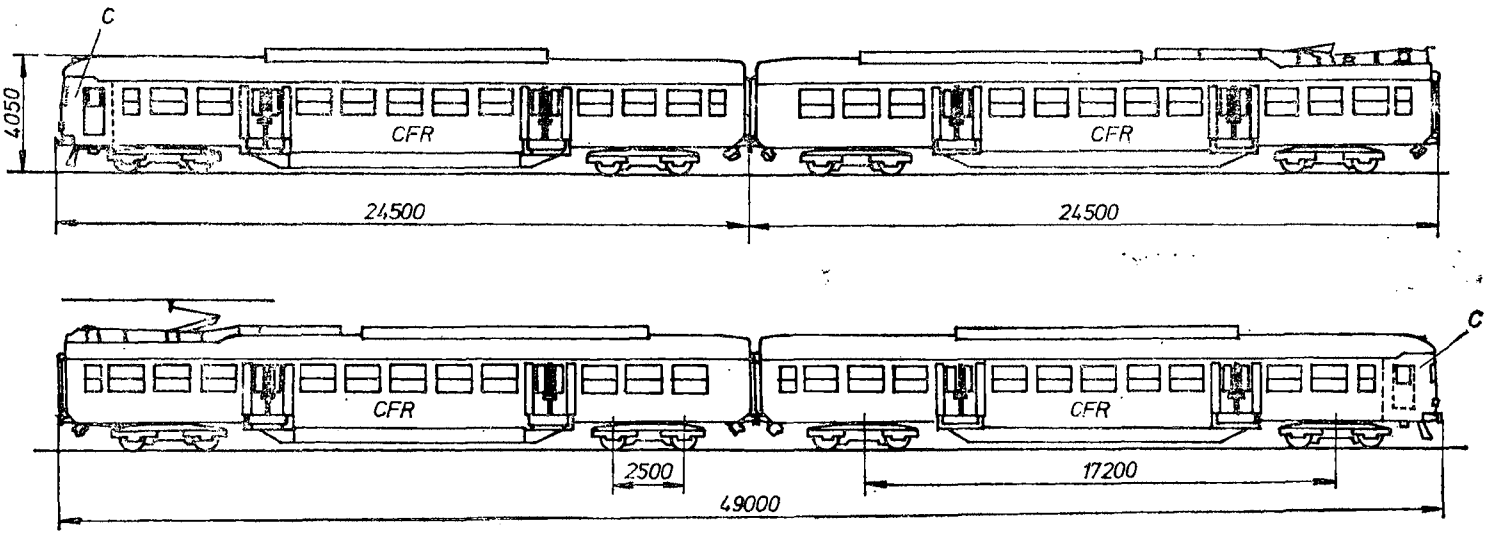



*Fig. 8.3.* Vedere generală a *RE* tip C.F.R., cu indicarea dimensiunilor principale.

cări și îmbunătățiri, industria noastră constructoare de mașini să treacă la fabricarea seriei zero (aceasta este faza actuală — 1980).

Parametrii constructivi și caracteristicile tehnice ale ramei electrice prototip C.F.R. sînt indicați în tabelul 8.2, de unde se poate constata (v. și tabelul 8.1) că aceștia sînt la nivelul tehnicii actuale).

Ca date caracteristice suplimentare, necuprinse în tabelul 8.2, se specifică și următoarele:

— greutatea totală cu călători . . . . . 272 t
— sarcina maximă pe osie . . . . . 18 t/osie
— forța de tracțiune maximă (1 min) . . . . . 27 tf
— forța de tracțiune de durată . . . . . 9,8 tf
— puterea de frînare (electrică) de scurtă durată (1 min.) 3200 kW
— puterea de frînare de durată . . . . . 2 400 kW

Din punct de vedere al compunerii, rama electrică este concepută astfel (fig. 8.3):

— secție de tracțiune (două vagoane cuplate avînd una cabină de conducere; poate circula izolată însă necesită întoarcere);

— rama electrică propriu-zisă reversibilă alcătuită din patru vagoane, cu cabine de conducere la ambele capete;

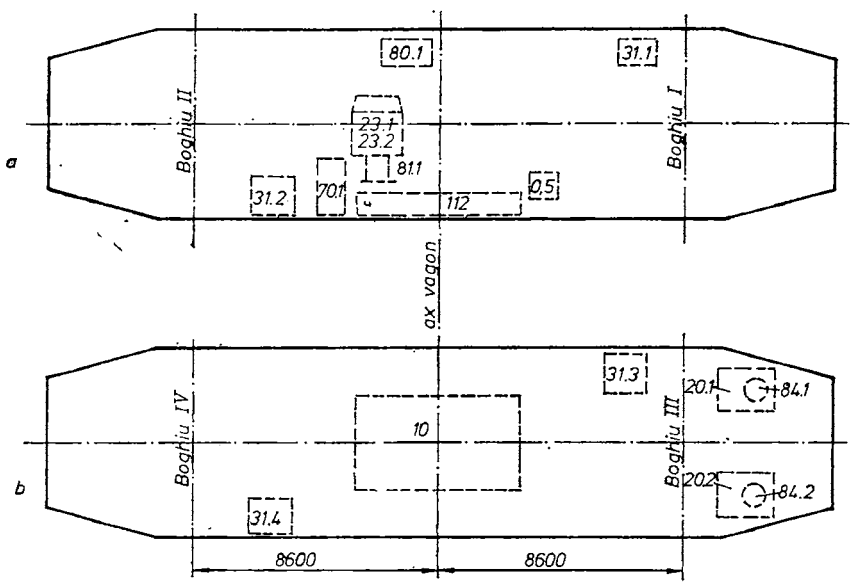



*Fig. 8.4.* Dispunerea echipamentului principal pe o secție de tracțiune : *a* — pe vagonul de capăt; 23.1, 23.2—self de aplatisare 81.1 — notoventilator pentru self; 31.1, 31.2 — inversor de mers; 70.1 — grup Arno; 112 — baterie de acumulatoare; 105 — instalație de încărcare baterie; 80,1 — moto-compresor; *b* — pe vagonul intermediar: 10 — agregat transformator; 20.1, 20.2 — instalație de redresare și reglare; 31.3, 31.4 — inversor de mers; 84.1, 84.2 — moto-ventilator pentru redresor (simbolurile din figură corespund celor din schema electrică de forță, fig. 8.4).

— tren electric automotor în compunere cu șase vagoane, sau cuplarea a două sau trei rame în comandă multiplă de la un singur post de conducere.

Dispunerea echipamentului principal pe o secție de tracțiune (vagon de capăt + vagon intermediar) este arătată în figura 8.4.

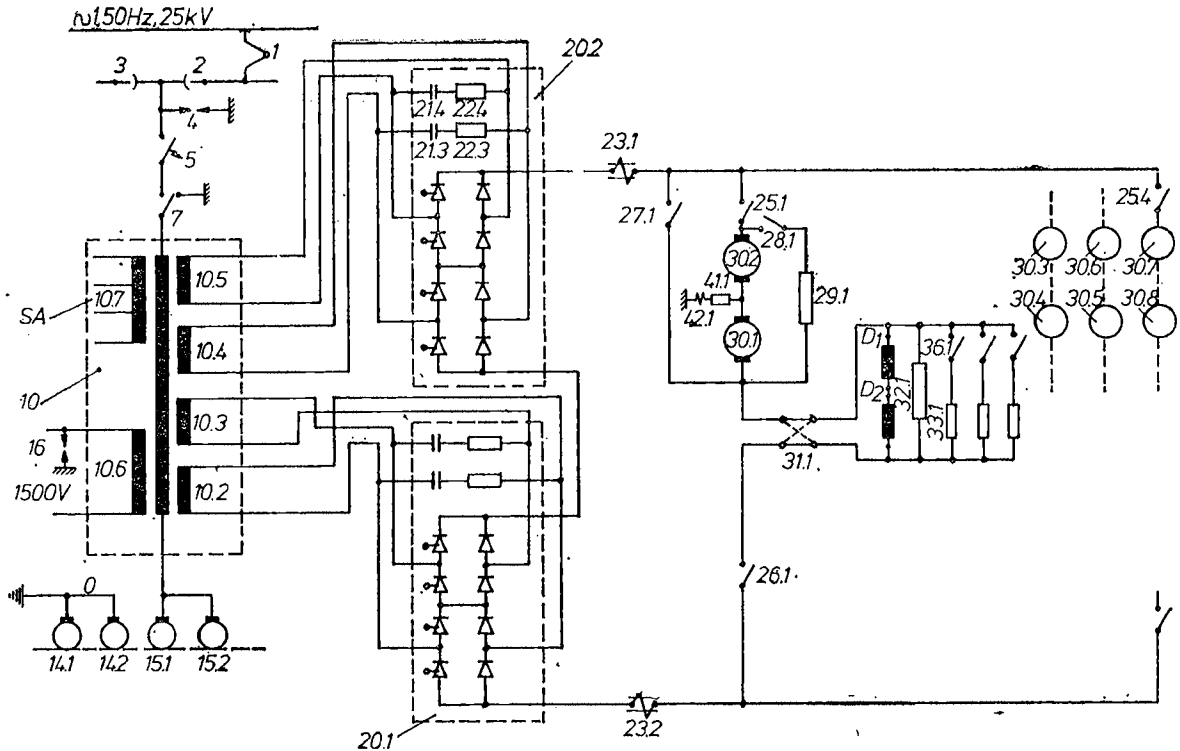



*Fig. 8.5.* Schema circuitului principal de forță: *1* — pantograf; *2, 3* — separatoare de acoperiș; *4* — descărcător; *5* — întrerupător automat principal; *7* — comutator cu contact de punere la pămînt a părții de 25kV a transformatorului; *10* — agregat transformator principal; 14.1, 14.2, 15.1, 15.2 — contact osie pentru returul curentului; 20.1, 20.2 — instalație de redresare și reglare cu punți tiristorizate mixte; 21.1 ... 21.4, 22.1 ... 22.4 — condensatoare și rezistențe pentru protecție la supratensiuni; 23.1, 23.2 — self de aplatisare (700A; 1400 A pentru 1 min; $L=2\times$ $\times$ 3 m $H$); 25.1 ... 25.4, 26.1 ... 26.4 contactoare de linie; 27.1 — contactor excitație frînare; 28.1 ... 28.4 — contactor frînare; 30.1 ... 30.8 — motor de tracțiune; 31.1 ... 31.4 inversor de mers; $D_1$, $D_2$ — înfășurare excitație motor; 32.1...32.4— rezistență pentru șuntare permanentă a excitației; 36.1 ... 38.4—contactoare și 33.1... 35.4— rezistențe pentru reducerea cîmpului; 41.1 ... 41.4 rezistență de limitare pentru releul de punere la masă 42.1 ... 42.4; 29.1 ... 29.4 — rezistență de frînare.

Tot echipamentul este amplasat în cutii etanșe amenajate sub șasiul vagonului cu excepția pantografului, separatoare de acoperiș, descărcător, întrerupător automat, rezistențele de frînare, care sînt plasate pe acoperiș și instalația de redresoare și reglare care sînt plasate în vagon.

8.3.1. **Schema circuitului principal de forță.** Pentru un echipament aferent unei secții schema este redată în figura 8.5, în textul căreia s-a specificat echipamentul principal și parametrii acestuia.

Agregatul transformator principal (10) are o înfășurare de înaltă tensiune (10.1), patru înfășurări secundare (10.2 ... 10.5) pentru alimentarea redresorului, o înfășurare pentru alimentarea serviciilor auxiliare (10.7) și o înfășurare pentru alimentarea circuitului de încălzire (10.6). Caracteristicile principale ale transformatorului sînt următoarele:

— putere nominală . . . . . 1480 KVA;
— curent primar $I_1$: nominal 59,2 A; uniorar 74 A; de 1 min. 111,5 A;
— înfășurarea circuitului de tracțiune: putere 4 × 325 kVA; tensiune 4 × 465 V; curent 700 A; curent uniorar 900 A; curent de scurtă durată 1 min. 1400 A;
— înfășurarea de încălzire: putere 100 kVA; tensiune 1500 V; tensiunea de scurtcircuit cu reactanță 1,4 %;
— înfășurarea pentru servicii auxiliare: putere 80 kVA; tensiune (prize) 136—233—406 V; puterea pe priza de 136 V — 55 kVA; tensiunea de scurtcircuit cu reactanță 3,7%;
— greutatea transformatorului cu ulei și accesorii . . . . . 4550 kg.

*Instalația de redresare și reglare* este alcătuită din două blocuri (20.1 — 20.2) legate în serie și un bloc de comandă pentru reglare. Fiecare bloc, la rîndul său, este alcătuit din două punți tiristorizate mixte (cu comandă asimetrică) înseriate, circuite de alimentare a generatoarelor de impulsuri, regulatoarele pentru motoare în regim de tracțiune și frînare, elementul de comandă a generatoarelor de impulsuri pentru comanda tiristoarelor, circuite logice pentru prelucrarea semnalelor primite de la postul de comandă și de la traductoarele de curent, circuite de alimentare-protecție — semnalizare.

Principalele caracteristici tehnice ale unui bloc de redresare — reglare sînt următoarele:

— tensiunea de alimentare . . . . . 2 × 465 V c.a
— tensiunea de ieșire (reglabilă) . . . . . 0—730 V c.c
— curent nominal . . . . . 900 A c.c
— curent de vîrf, 1 min. . . . . 1400 A c.c
— temperatura aerului de răcire . . . . . —35°C ... + 40°C
— prize de tensiuni ... 110 V c.c+20% — 30%; 220 V c.c + 20%— 30%
— dimensiuni gabaritice . . . . . 920 × 800 × 1990 mm
— greutate . . . . . 600 kg.

8.3.2. **Instalația de comandă și reglare.** Ținînd seamă de specificul funcțional al ramei electrice și de faptul că între stații sînt distanțe relativ mici (cca. 5 km) este necesară obținerea unei accelerații la demaraj și a unei decelerații la frînare de valoare mare (de ordinul 0,9 $m/s^2$).

Pentru obținerea unei accelerații de demaraj constante s-a adoptat soluția menținerii constante a curentului rotoric în timpul demarajului. Valoarea

de referință a curentului motoarelor la demaraj poate fi stabilită în 5 trepte, în funcție de accelerația dorită și de încărcarea ramei.

În timpul frînării electrice motoarele de tracțiune funcționează ca generatoare cu excitație separată.

La începutul frînării este menținută constantă puterea de frînare. După atingerea unei forțe de frînare prescrise se menține constantă această forță, pînă la obținerea curentului de excitație maxim, cînd urmează să intre în funcțiune frîna pneumatică.

Datorită distanței mici dintre stații s-a considerat că nu se justifică o reglare automată a vitezei.

Pentru reglările sus-menționate este utilizată o instalație de redresare și reglare de tip TYRUS ALFA R fabricată în R.S.C.

Schema-bloc a instalației de redresare și reglaj cu tiristoare este prezentată în figura 8.6.

*a. Redresoarele cu tiristoare Tyrus-Alfa-R.* Fiecare redresor este alcătuit din 2 punți asimetrice cu diode și tiristoare, legate în serie.

Ieșirile redresoarelor legate în serie, alimentează 4 grupuri de cîte 2 motoare de tracțiune legate în serie, grupurile fiind legate în paralel.

În timpul frînării electrice motoarele de tracțiune funcționează în regim de generator cu excitație independentă, redresoarele alimentînd circuitele de excitație ale motoarelor de tracțiune. Alimentarea se face în acest caz de la o singură punte a redresorului 20.1.

În afara circuitelor de forță, fiecare redresor mai conține două blocuri generatoare de impuls $y_{01}$ și $y_{02}$ (blocul $y_{01}$ comandă deschiderea tiristoarelor din prima punte; blocul $Y_{02}$ comandă deschiderea tiristoarelor din a doua punte).

Impulsurile se aplică punților asimetrice prin transformatoare de separare.

Creșterea tensiunii redresate are loc în patru trepte prin deschiderea succesivă a punților celor 2 redresoare.

Tensiunea de alimentare de 220 V c.a. se aplică la blocurile $Y_{01}$, $Y_{02}$ cu ajutorul releului $Y_3$.

Semnalele +15 și bloc servesc la blocarea impulsurilor cu ocazia închiderii blocurilor.

Tensiunea proprie de comandă 0—10 V se introduce la intrările $h_1$, $h_2$.

Semnalele $\Sigma i$ și $\Sigma No$ servesc la blocarea impulsurilor corespunzătoare tuturor celor 4 trepte în cazul funcționării protecției maximale de curent.

Totodată declanșarea protecției maximale de curent este indicată cu ajutorul releului *No* care generează semnalul de alarmă *P*.

Protecția împotriva supratensiunilor se realizează cu ajutorul circuitelor *RC*, 21.1—**4.**

*b. Blocul de comandă și reglare E.7.* Blocul de comandă și reglare asigură prelucrarea semnalelor tehnologice de la postul de comandă, și după prelucrarea lor efectuează comanda redresoarelor 20.1 și 20.2.

De asemenea asigură informații inverse și semnalizarea la postul de comandă.

Lista semnalelor prelucrate:

*J*: comanda tracțiunii;

*B*: comanda frînării electrice;

*F2*: semnal pentru treapta a 2-a a curentului de tracțiune;

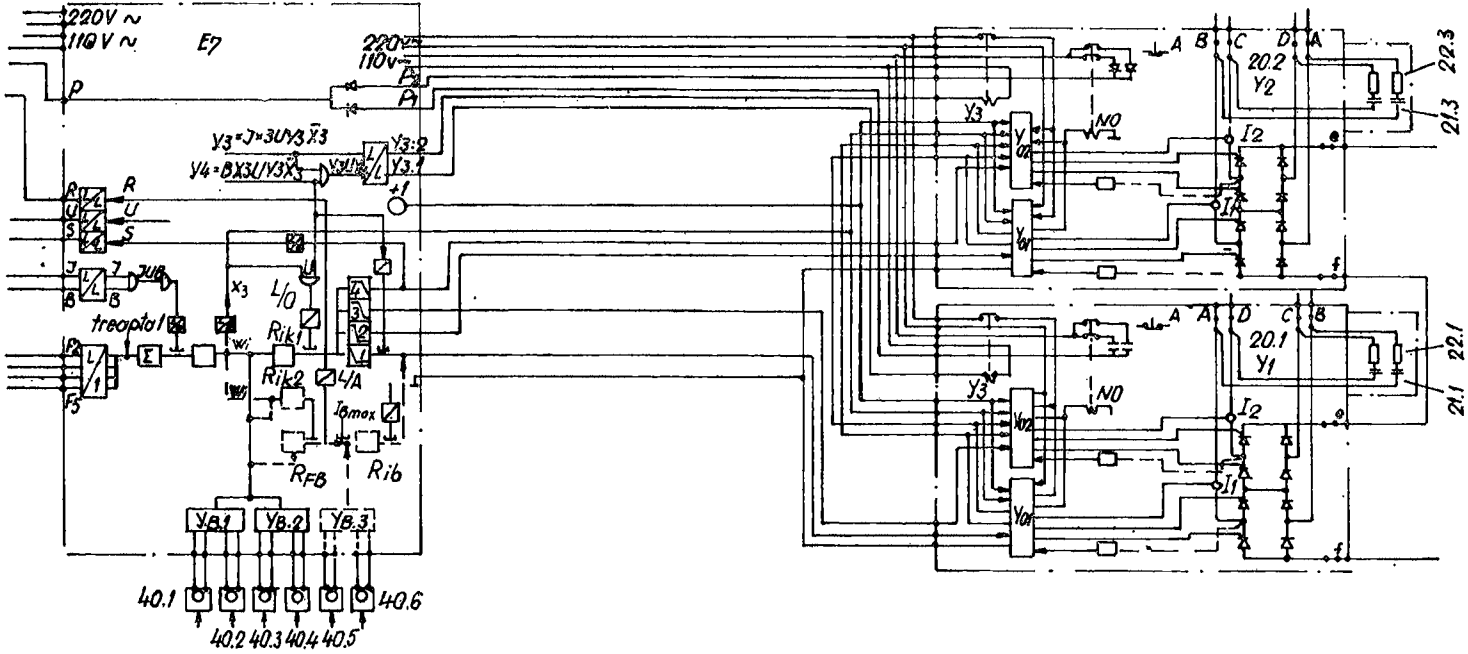



*Fig. 8.6.* Schema-bloc a instalației de redresare și reglaj cu tiristoare TYRUS-ALFA-R : 20.1, 20.2 — blocuri redresoare ; YOI, YO2, — generatoare de impulsuri ; 21—22.1-4 — grupuri *RC* pentru limitarea supratensiunilor ; $I_1$, $I_2$ — traductoare de curent pentru protecția redresorului împotriva supracurenților ; *No* — releu pentru semnalizarea avariei ; Y3 — releu pentru alimentare ; *E7* — bloc de comandă și reglare ; Σ — element sumator ; $Ri_{k1}$ — regulator de curent în timpul regimului de tracțiune ; $Ri_{k2}$ regulator de curent rotoric în timpul frînării ; $Ri_b$ — regulatorul curentului de excitație în timpul frînării ; $R_{FB}$ — regulatorul forței de frînare ; $Y_{B1}$, $Y_{B2}$, $Y_{B3}$ — blocuri pentru compararea curenților ; *L/L* — convertor semnal logic/semnal logic ; *A/L* — convertor semnal analogic/semnal logic ; *L/O* — inversor logic ; *U* — sumator logic ; *1, 2, 3, 4* — circuite pentru comanda generatoarelor de impulsuri ; 40.1 — 40.4 — traductoare, pentru curentul rotoric ; 40.5 — 40.6 — traductoare pentru curentul de excitație.

$F3$: semnal pentru treapta a 3-a a curentului de tracțiune;
$F4$: semnal pentru treapta a 4-a a curentului de tracțiune;
$F5$: semnal pentru treapta a 5-a a curentului de tracțiune.

Semnalele transmise spre postul de comandă:

$S$: deschiderea completă a tiristoarelor (comanda introducerii treptelor de șuntare);

$U$: semnal care permite comutarea în schema de forță, în lipsa curentului:

$$U = X_3 \cdot \bar{y}_3 \bar{y}_4$$

$R$: saturarea frînei electrice (curentul de excitație în timpul frînării are valoarea maximă);

$P$: semnal de avarie la redresoarele electrice $P = P_1 + P_2$.

Semnale la blocurile redresoare (20.1 — 20.2)

$P_1$: defectarea primului redresor;

$P_2$: defectarea celui de-al 2-lea redresor;

$Y_{3\cdot1}$: comandă pornirea primului redresor (în procesul de tracțiune și de frînare electrică, $y_{3\cdot1} = y_3 + y_4$);

$y_{3\cdot2}$: comandă pornirea celui de-al 2-lea redresor (în procesul de tracțiune).

Alte semnale (0 — 15 V):

$x_3$: indică anularea tensiunii de referință $w_i$ de la ieșirea elementului de creștere:

$$x_3 = 1 \text{ (semnal logic) pentru } w_i < 5\% \, w_i \; max.;$$

$y_3$: semnal pentru memorarea regimului de tracțiune:

$$y_3 = J x_3 - \dot{y}_3 \bar{x}_3,$$

unde $\dot{y}_3$ reprezintă semnalul $y_3$ în secvența anterioară;

$y_4$: semnal pentru memorarea regimului de frînare:

$$y_4 = B x_3 + \dot{y}_4 \bar{x}_3;$$

$U_{R1} - U_{R4}$: tensiuni analogice pentru comanda punților redresoare cu tiristoare.

Semnalele de la traductoarele de curent:

$i_{k1} - i_{k4}$: curenții rotorici ai celor 4 grupuri de motoare;

$i_{B1} - i_{B2}$: curenții de excitație în timpul procesului de frînare.

*c. Funcționarea.* În schema-bloc se notează circuitele electrice de reglare analogică în timpul tracțiunii prin linie groasă, în timpul frînării prin linie întreruptă, iar circuitele auxiliare logice prin linia subțire.

*Reglarea tracțiunii.* Semnalele de intrare $F_1 - F_5$ ($F_1$ fiind aplicat permanent) se introduc în elementul de creștere, care formează valoarea prescrisă a curentului, $w_i$. Caracteristica elementului de creștere este astfel aleasă încît să limiteze viteza de creștere a curentului de sarcină al redresorului.

Mărimea $w_i$ se compară la intrarea regulatorului $R_{ik1}$ cu valoarea maximă a curenților retorici $i_{k1} - i_{k4}$. Regulatorul de tip integral $R_{ik1}$ comandă apoi cir-

cuitele electrice 1—4 care au astfel de caracteristici încît odată cu creşterea semnalului de intrare să aibă loc scăderea ieşirilor 1, apoi 2,3 şi 4.

Ieşirile circuitelor 1—4 formează tensiunea de comandă pentru generatoarele de impuls a celor două blocuri redresoare *Tyrus-Alfa-R*.

Scăderii tensiunii de comandă $U_r$ a treptei respective îi corespunde deplasarea fazei înainte, adică deschiderea tiristoarelor.

*Reglarea frînării.* Valoarea de referinţă $w_i$ de la intrarea regulatorului $Ri_{h2}$ este analogă cu cea din timpul tracţiunii şi se compară cu valoarea maximă a curenţilor $i_{k1} - i_{k4}$. Ieşirea regulatorului $R_{ik2}$ limitează valoarea de referinţă a regulatorului $R_{iB}$.

Aceasta se compară cu valoarea reală a curentului de excitaţie $i_B$ (max. 1,2).

Ieşirea regulatorului $Ri_B$ comandă direct tensiunea $U_{R1}$, adică faza impulsurilor de aprindere pentru prima treaptă a tensiunii de ieşire.

În domeniul vitezelor medii, forţa maximă de frînare este limitată de regulatorul $R_{FB}$ care la rîndul lui reduce valoarea de referinţă a curentului de excitaţie, astfel încît forţa de frînare $F_B$ să rămînă constantă.

*Circuite logice.* Intrarea în elementul de creştere este blocată de semnalul logic $\bar{J}\ \bar{B}$ ceea ce asigură startul elementului de creştere de la zero şi numai în prezenţa unuia din semnalele $J$ sau $B$.

Semnalul $x_3$ indică faptul că valoarea de referinţă $w_i$ este practic nulă ($w_i < 0{,}05\ w_{i\,max}$) şi blochează impulsurile de aprindere şi ieşirea lui $Ri_{k1}$.

Funcţia logică $y_4 = B\ x_3 + \dot{y}_4\bar{x}_3$ comandă pornirea procesului de frînare şi blochează ieşirea circuitului 1 în timpul acestui proces.

Funcţia logică $y_3 = Jx_3 + \dot{y}_4\bar{x}_3$ comandă pornirea regimului de tracţiune şi blochează ieşirea regulamentului $Ri_B$ în timpul tracţiunii.

Semnalul $S$ (deschiderea completă a treptei a 4-a de creştere a tensiunii) este generat de scăderea tensiunii $U_{R4}$ la zero.

Semnalul $R$ este general în momentul în care $i_B = i_{B\,max}$.

Semnalul $U$ este generat de scăderea lui $w_i$ sub 0,05 $wi_{max}$.

$$U = x_3\bar{y}_3\bar{y}_4$$

şi asigură comutarea circuitelor electrice de forţă fără curent.

### 8.3.3. **Schema electrică de comandă a regimului de tracţiune şi frînare** (fig. 8.7 şi fig. 8.8)

*Demararea*

Maneta inversorului 200.1 din controler se pune pe poziţia „Înainte" iar întreruptorul cu pedală pentru aparatul de siguranţă trebuie apăsat în poziţia de funcţionare.

Inversoarele de mers 31.1—4 comută pe poziţia de mers înainte.

Se trece volanul controlerului 200.2 în poziţia „Tracţiune". Se închide contactul 651—M11.

Releele 151.3 (releu de tensiune minimă în linia de contact) şi 152.6 (releu auxiliar pentru releele de presiune) sînt înclemate astfel că releul 151.11 (comandă contactoare de linie) înclemează.

Bobinele contactoarelor de tracţiune 25.1—4 şi 26.1—4 primesc tensiune şi contactoarele înclemează.

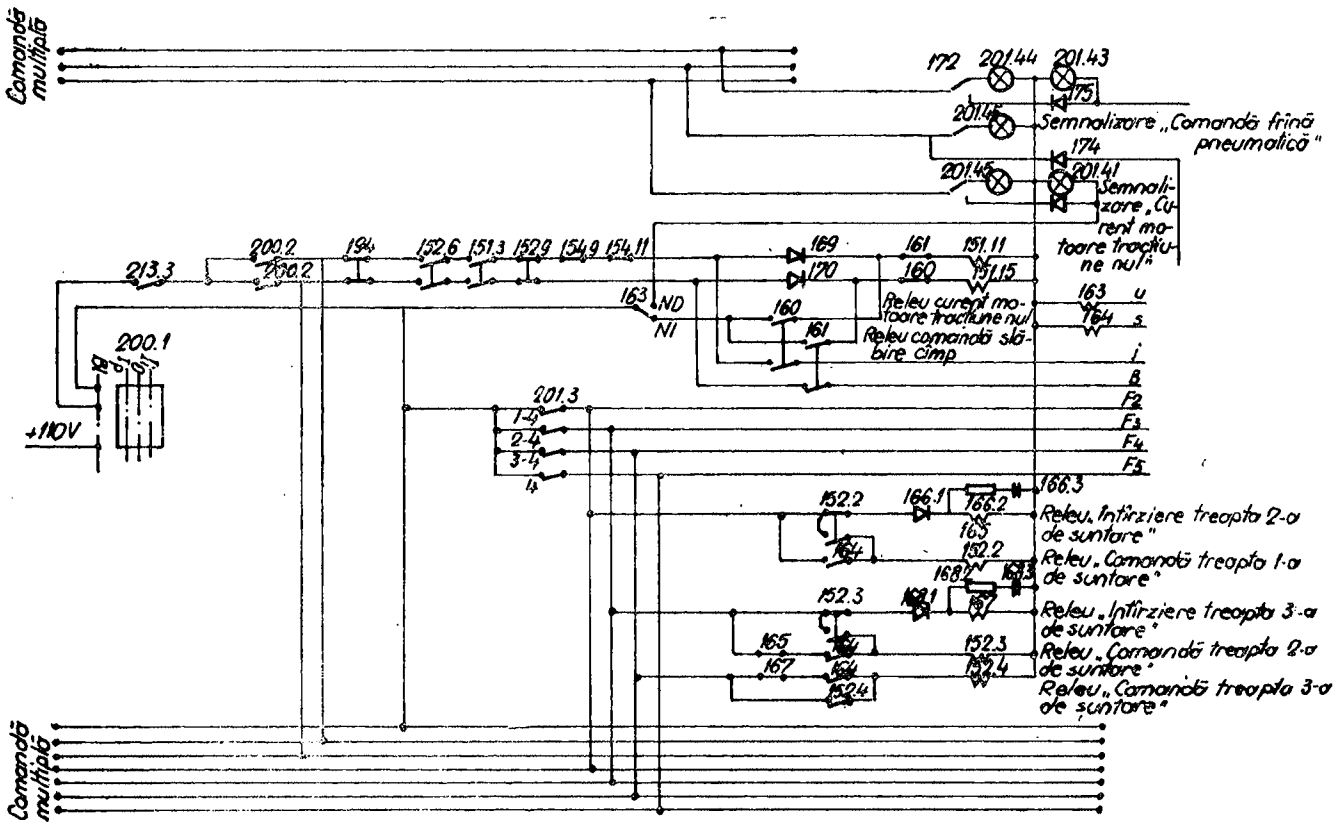



*Fig. 8.7.* Circuitele de comandă pentru instalația de redresare și reglare cu tiristoare : 151.3— releu „Tensiune minimă în linia de contact"; 151.11 — releu „Comandă contactoare de linie"; 151.15 — releu „Comandă contactoare de frînare; 152.2 — releu „Comandă treapta 1 slăbire cîmp"; 152.3 — releu „Comandă treapta 2 slăbire cîmp"; 152.4 — releu „Comandă treapta 3 slăbire cîmp"; 152.9— releu de deconectare pentru contactoare; 154.4 — 154.11 — releu auxiliar de presiune pentru ventilatoarele redresoarelor; 160 —releu „Control contactoare de linie"; 161— releu „Control contactoare de frînare"; 163— releu „curent motoare de tracțiune nul"; 164— releu „comanda slăbire cîmp; 165— releu „întîrziere treapta 2 slăbire cîmp; 167 — releu „întîrziere treapta 3 slăbire cîmp"; 166.1, 168.1, 169, 170, 173 — 175 — diode de blocare; 166.2, 168.2— rezistența de limitare; 166.3, 168.3 — condensator; 172 — comutator pentru semnalizare; 194— separator curent de comandă; 200.1 — întrerupător pentru inversorul de sens; 200.2— comutator tracțiune-frînare; 201.3 — comutator trepte de curent motoare de tracțiune; 201.41—42 12—lampă de semnalizare „Curentul motoarelor de tracțiune nul"; 201.43-44 — lampa de semnalizare „Defecțiuni la redresor; 201.45— lampa de semnalizare „comandă frînă pneumatică"; 213.3 — aparat de siguranță VACMA.

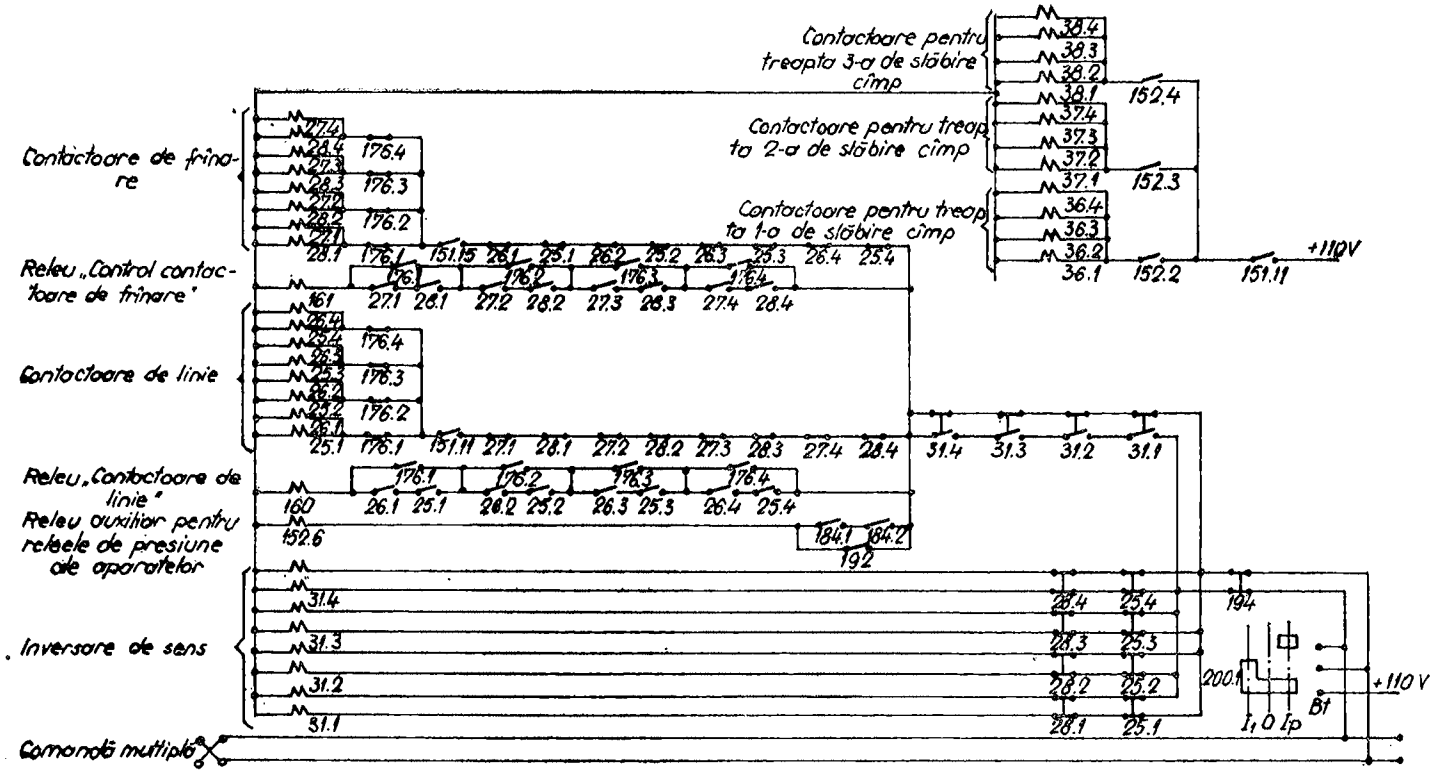



*Fig. 8.8.* Circuite de comandă tracțiune — **frînare**: 25-26.1-4 — contactoare de linie; 27-28.1-4 — contactoare pentru frînare electrică; 36.1-4 — contactoare de slăbire cîmp (treapta 1); 37.1-4 — contactoare de slăbire cîmp (treapta 2); 38.1-4 — contactoare de slăbire cîmp (treapta 3); 151.11 — releu „comandă contactoare de linie"; 151.15 — releu „comandă contactoare de frînare"; 152.2-4 — releu „comandă slăbire cîmp"; 160 — releu „control contactoare de linie" 161 — releu „control contactoare de frînare"; 176.1.4 — separator motoare de tracțiune; 184.1-2 — releu de presiune aer aparate; 192 — întrerupător de scurtcircuitare pentru releul de presiune aer aparate; 194 — separator curent de comandă; 200.1 — întrerupător pentru inversorul de sens.

Contactele auxiliare ale contactoarelor 25.1—4, 26.1—4 comandă înclemarea releului 160 (control contactoare de linie).

La rîndul lor contactele releului 160 închid circuitul ce alimentează borna $J$ a blocului E7 cu 110 V c.c creîndu-se semnalul $J$.

Acest semnal comandă deschiderea treptată a tiristoarelor din instalația de redresare și reglaj cu tiristoare astfel încît curentul motoarelor de tracțiune să crească conform programului dat de elementul de creștere $w_i$. Valoarea curentului depinde de poziția comutatorului 201.3, pentru stabilirea regimului de demaraj.

La creșterea valorii prescrise $w_i$ peste 5% din valoarea maximă dispare tensiunea de la borna $U$ (semnalul $U$ ia valoarea logică 0) a blocului E7.

Releul 163 declemează astfel încît releul 151.11 se alimentează și prin contactul normal închis al releului 163 în serie cu contactul normal deschis al releului 160 și cu contactul normal închis al releului 161.

Tensiunea de alimentare a motoarelor de tracțiune crește pînă la valoarea maximă. În momentul deschiderii complete a tiristoarelor, la borna $S$ a blocului E7, se generează un semnal de 110 V c.c. (semnal $S$) care comandă slăbirea cîmpului.

Releul 164 înclemează și se închid contactele sale normal deschise.

Presupunem că comutatorul 201.3 pentru treptele de curent se află pe poziția 4 (curent de demaraj maxim). Releul 152.2 pentru „comandă treapta 1 de șuntare" înclemează. Releul 165 cu temporizare la deschidere rămîne înclemat timp de 0,5 sec., împiedicînd înclemerea releului 152.3, care declemează.

Bobinele contactoarelor pentru treapta 1 de slăbire cîmp 36.1—4 primesc tensiune și contactoarele înclemează.

Se închide treapta 1 de șuntare.

În primul moment tensiunea de la ieșirea redresorului scade, apoi crește din nou, astfel încît curentul să rămînă constant.

Prin scăderea tensiunii semnalul $S$ dispare, releul 164 declemează. Relul 152.5 este automențiuut prin contactul său normal deschis.

În momentul în care tensiunea atinge din nou valoarea maximă, semnalul $S$ reapare și releul 164 înclemează din nou. Releul 165 fiind acum declemat, releul 152.3 înclemează.

Releul 167 cu temporizare la deschidere mai rămîne înclemat circa 0,5 sec. după care declemează. În acest timp un contact normal închis al releului 167 împiedică înclemarea releului 152.4. Bobinele contactoarelor pentru treapta a 2-a de slăbire cîmp, 37.1—4, primesc tensiune și contactoarele înclemează.

În primul moment tensiunea de la ieșirea redresorului scade, apoi crește din nou, curentul rămînînd constant.

Semnalul 8 dispare și releul 164 declemează. Releul 152.3 este automențiuut printr-un contact al său normal deschis.

La următoarea apariție a semnalului $S$ releul 164 înclemează din nou, bobina releului 152.4 pentru „Comanda treapta a 3-a de slăbire cîmp" primește tensiune și releul înclemează.

Releul 152.4 se automențiue și bobinele contactoarelor pentru treapta a 3-a de slăbire cîmp 38.1—4 primesc tensiune și contactoarele înclemează.

Se introduce treapta a 3-a de șuntare.

Tensiunea de alimentare a motoarelor de tracțiune scade, în primul moment, pentru ca apoi să crească din nou pînă la valoarea maximă.

*Frînarea electrică*

Se aduce volanul controlerului 200.2 în poziția „frînare".

Tensiunile la bornele *J* și *B* ale blocului E7 (respectiv semnalele *J* și *B*) au valoarea logică O. Curentul motoarelor de tracțiune, scade pînă la zero. În acest moment la borna *U* a blocului E7 apare un semnal de 110 V c.c. (semnalul U).

Releul 163 înclemează astfel că bobina releului 151.11 nu mai este alimentată, releul declemează și comandă la rîndul său declemarea contactoarelor de linie 25.1—4 și 26.1—4.

Releele pentru comanda treptelor de șuntare 152.2—4 declemează. Contactoarele de slăbire cîmp 36—38.1—4 declemează. Releul 160 (pentru „control contactoare de linie") declemează.

Bobina releului 151.15 (comandă contactoare de frînare) primește tensiune și releul înclemează, astfel că bobinele contactoarelor pentru frînare 27.1—4 și 28.1—4 primesc tensiune și contactoarele înclemează. Motoarele de tracțiune sînt conectate ca generatoare cu excitație separată. Tensiunea de excitație este furnizată de redresorul de tiristoare.

Releul 161 (control contactoare de frînare) fiind comandate de contactele auxiliare ale contactoarelor de frînare, înclemează.

Se aplică tensiune la borna *B* a blocului *E7*. (semnalul *B*) Semnalul *B* comandă creșterea tensiunii de excitație. Creșterea tensiunii de excitație are loc menținîndu-se la început puterea de frînare constantă. În momentul atingerii unei forțe de frînare de referință, frînarea continuă cu menținerea constantă a forței de frînare. Curentul de excitație continuă să crească pînă la atingerea valorii maxime admise.

În acest moment la borna *R* a blocului E7 se generează un semnal de 110 V c.c. (semnalul *R*) care semnalizează necesitatea introducerii frînării pneumatice.

Se observă că schema este astfel realizată încît comutarea contactoarelor de tracțiune și de frînare 25—28.1—4 să aibă loc numai în absența curentului.

8.3.4. **Motorul electric de tracțiune.** Acest motor este tipul TN—74 (fabricație IMEB—RSR), de curent continuu cu excitație serie, avînd următoarele caracteristici principale:

— putere nominală . . . . . 120 kW.
— putere de regim uniorar. . . . . 140 kW.
— tensiune nominală . . . . . 750 V
— curent nominal . . . . . 178 A
— curent uniorar . . . . . 205 A
— curent maxim . . . . . 350 A
— turație: nominală 1425 rot/min, unionară 1330 rot/min, maximă 3000 rot/min.
— reducerea cîmpului: permanent = 0,9; $CR_1 - 0{,}9 \times 0{,}8 = 0{,}72$; $CR_2 - 0{,}9 \times 0{,}65 = 0{,}585$; $CR_3 - 0{,}9 \times 0{,}556 = 0{,}5$.

Caracteristicile motorului TN 74 sînt redate în diagrama din figura 8.9.

Din schema circuitului de forță (fig. 8.5) se observă că două motoare sînt legate în permanență în serie (formînd o grupă). O asemenea soluție aduce unele avantaje dintre care se menționează: reducerea numărului de contactoare de tracțiune, contactoare de frînare, contactoare de reducere a cîmpului; reducerea numărului inversoarelor de mers; reducerea numărului rezistențelor de șuntare a excitației; simplificarea cablajului. Pentru ca tensiunea circuitului principal să nu se dubleze, punctul median al ramurei celor două motoare se leagă la masă printr-o rezistență de limitare (41.1) și releu de punere la masă (158.7), prin care asigură și selectivitatea punerii la masă pe ramuri de motoare.

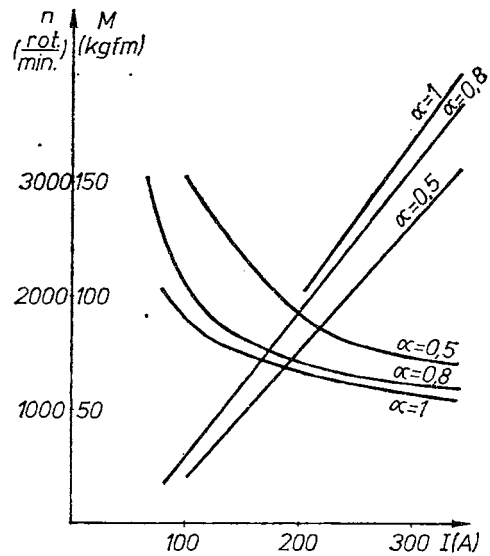



*Fig. 8.9.* Caracteristicile motorului TN 74 (turație, cuplu).

8.3.5. **Serviciile auxiliare.** Echipamentul electric al serviciilor auxiliare are o importanță deosebită în asigurarea funcționării normale și economice a trenurilor electrice și în utilizarea lor fără defectări pe linie.

Defectele intervenite în funcționarea serviciilor auxiliare pot provoca scoaterea din funcțiune al întregului vehicul, motiv ce determină o alegere judicioasă a sistemului de alimentare pentru serviciile auxiliare, cît și o alegere adecvată a electromotoarelor pentru antrenarea serviciilor auxiliare.

Dintre soluțiile posibile de realizare a serviciilor auxiliare (tratate la locomotivele cu redresoare, v. cap. 6) — pentru rama electrică CFR (model experimental) s-a ales grup rotativ mono-trifazat *ARNO* din considerente de conjunctură privind furnizarea unor echipamente (transformator, redresor, instalația de reglare) din import RSC. Dealtminteri este de menționat că o atare soluție (grup rotativ) este contraindicată pe o ramă electrică din cauza vibrațiilor și zgomotelor ce le produce. În prezent se folosește convertizor mono-trifazat static (vezi instalația de pe rama electrică ET 420-paragraf 4).

Schema utilizată pe rama electrică C.F.R. este redată în figura 8.10.

Alimentarea serviciilor auxiliare se realizează de la înfășurarea 10.7 pentru alimentarea serviciilor auxiliare, al transformatorului principal, prevăzută cu patru borne de ieșire.

Un capăt a înfășurării pentru serviciile auxiliare (borna *do*) este pus la masă prin intermediul unui transformator de curent 67.6 și prin releul de punere la masă 153.14, cu acționare asupra disjunctorului.

Serviciile auxiliare sînt protejate împotriva supratensiunilor de descărcătorul de supratensiuni 63.

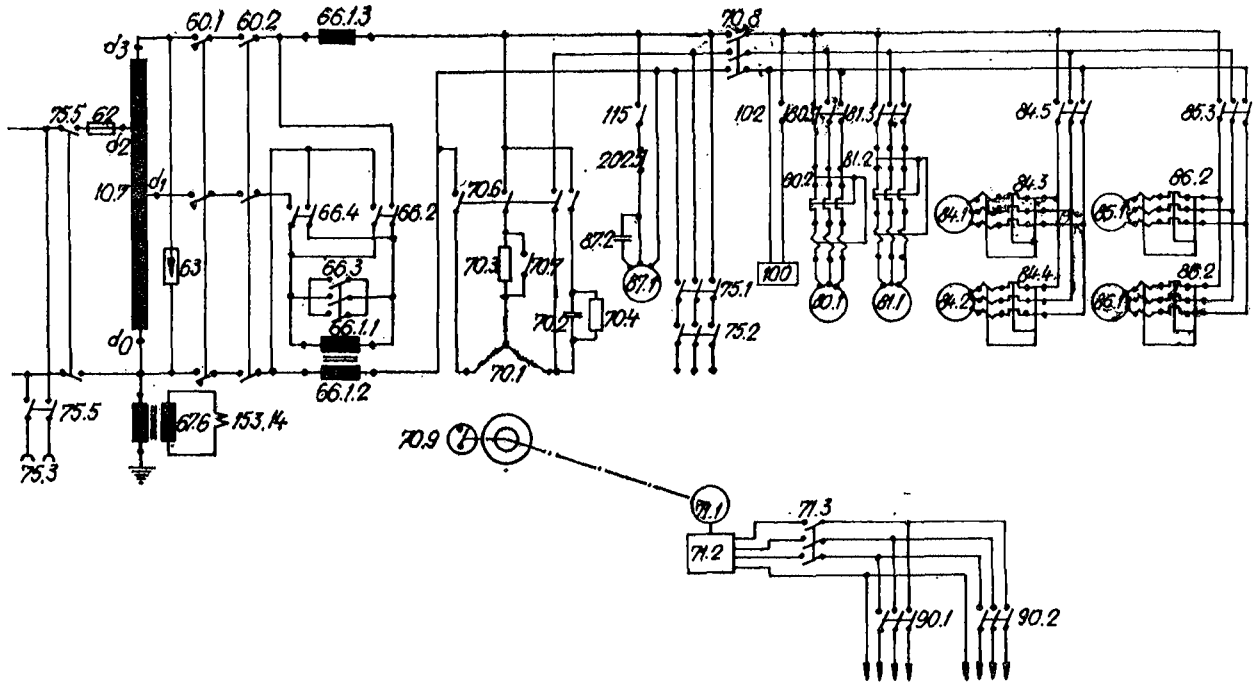



*Fig. 8.10.* Schema electrică principială a serviciilor auxiliare de pe rama electrică model experimental 25 kV, 50 Hz pentru C.F.R.: 10.7 — înfășurarea transformatorului principal pentru serviciile auxiliare; 60.1 — întrerupător automat; 60.2— contactor; 62 — siguranță fuzibilă; 63 — descărcător de supratensiuni; 66.1 — transformator de stabilizare; 66.2.4 — contactoare pentru transformatorul de stabiliziare; 67.6 — transformator de curent; 70.1 — convertizor Arno; 70.2 — condensator de pornire Arno; 70.3— rezistența de pornire Arno; 70.4— rezistență de descărcare; 70.5— contactor conectare 70.2; 70.6 — contactor conectare Arno; 70.7— contactor șuntare 70.3; 70.8 — contactor conectare consumatori; 70.9 releu tip Alnico; 71.1 — generator sincron; 71.2 — regulator electronic pentru 71.1; 71.3 — întrerupător automat; 75.1— contactor alimentare de la sursă exterioară 3 × 380 V, 50 Hz; 75.2 — priză alimentare de la sursă exterioară 3 × 380 V, 50 Hz; 75.3 — priză alimentare de la sursă exterioară 220 V, 50 Hz; 75.5 — comutator; 80.1 — motor pentru compresor; 80.2 — întrerupător automat; 80.3 — contactor; 81.1 — motor pentru ventilator self; 81.2 — întrerupător automat; 81.3 — contactor; 84.1—2 motoare pentru ventilatoare redresoare; 84.3—4 — întrerupătoare automate; 84.5 — contactor; 85.1 — motor pentru pompa de ulei; 85.2— întrerupător automat; 85.5— contactor; 86.1 — motor pentru ventilator trafo; 86.2 — întrerupător automat; 87.1 — motor pentru agregat de încălzire și ventilație cabină; 87.2 — condensator pentru pornire; 87.1; 91—2 — contactoare pentru iluminat fluorescent; 100 — transformator auxiliar; 102 — întrerupător automat; 115 — întrerupător automat; 153 — 14 — releu maximal de curent; 202.5 — comutator.

Alimentarea serviciilor auxiliare de la înfășurarea 10.7 al transformatorului principal se realizează prin intermediul unui întrerupător automat 60.1 cu acționare manuală la închidere și printr-un contactor 60.2.

De la contactorul 60.2 se alimentează transformatorul de stabilizare 66.1, care realizează o stabilizare a tensiunii din circuitul serviciilor auxiliare, avînd conexiuni diferite în funcție de tensiunea din linia de contact, conexiuni realizate cu ajutorul contractoarelor 66.2—4 comandate de un regulator electronic.

Realizarea sistemului de tensiuni trifazate din sistemul de alimentare monofazat se obține cu ajutorul convertizorului *ARNO* 70.1.

Pornirea convertizorului *ARNO* se realizează prin conectarea condensatorului de pornire 70.2 prin intermediul contactorului 70.5 și prin închiderea contactorului 70.6 care realizează alimentarea lui.

Pe timpul pornirii pe o fază a convertizorului se conectează o rezistență de pornire (70.3) pentru limitarea curentului de pornire.

După terminarea pornirii condensatorul 70.2 este deconectat, iar rezistența de pornire se șuntează prin contactorul 70.7.

Convertizorul *ARNO* este prevăzut la un capăt de arbore cu un cuplaj mecanic pentru antrenarea generatorului sincron 71.1, care se conectează la rețeaua consumatorilor prin intermediul întrerupătorului automat 71.3 și prin intermediul contactoarelor 90.1 și 90.2.

Alimentarea consumatorilor de 220 V, 50 Hz se realizează de la bornele $d_0$—$d_2$ al înfășurării 10.7 al transformatorului principal, prin intermediul unei siguranțe fuzibile 62 și prin intermediul comutatorului 75.5.

Alimentarea consumatorilor serviciilor auxiliare de 3 × 380 V, 50 Hz de la o sursă exterioară se realizează prin intermediul prizei 75.2 și prin ntermediul contactorului 75.1.

Consumatorii de 220 V, 50 Hz sînt alimentați și de sursa exterioară prin intermediul unei prize 75.3, unui întrerupător automat 75.4 și prin intermediul comutatorului 75.5.

De la convertizorul *ARNO* se alimentează următoarele dispozitive de acționare auxiliare:

— Motorul 80.1 pentru compresorul de aer, alimentat prin contactorul 80.2 și prin întrerupătorul automat 80.3;

— Motorul 81.1 pentru ventilatorul selfului de aplatisare, alimentat prin contactorul 81.2 și întrerupătorul automat 81.3;

— Motoarele 84.1—2, pentru ventilatoarele instalației de redresare, alimentate prin intermediul contactorului 84.3 și prin intermediul întrerupătoarelor 84.4 respectiv 84.5;

— Motoarele 85.1 respectiv 86.1, pentru pompa de ulei, respectiv pentru ventilatorul transformatorului principal, alimentate prin intermediul contactorului 85.3 și prin intermediul întrerupătoarelor automate 85.2 respectiv 86.2;

— Motorul 87.1 pentru ventilatorul agregatului de încălzire și ventilație cabină, alimentat prin intermediul condensatorului 87.2, comutatorului 202,5 și prin intermediul întrerupătorului automat 115;

— Transformatorului auxiliar 100 prin intermediul întrerupătorului automat 102.

Generatorul sincron 71.1, prevăzut cu un regulator de tensiune electronic 71.2, alimentează prin intermediul întrerupătorului automat 71.3 și contac-

toarele 90.1 și 90.2 sistemul de iluminat fluorescent pentru vagonul de capăt respectiv pentru vagonul intermediar.

Consumatorii de 220 V, 50 Hz care necesită o alimentare independentă de grupul ARNO sînt:

— bobinele de acționare pentru contactoarele 66.2—4; 70.5—8;

— instalația de redresare și reglaj cu tiristoare.

Motoarele serviciilor auxiliare sînt protejate împotriva suprasarcinilor de durată și împotriva scurtcircuitelor prin întrerupătoare automate *ISOL*.

În întreaga rețea electrică a serviciilor auxiliare de pe rama electrică este prevăzută protecția contra electrocutării prin legarea la masă a carcaselor tuturor consumatorilor serviciilor auxiliare.

Schemele electrice de comandă pentru serviciile auxiliare sînt prezentate în figurile 8.11, 8.12 și 8.13.

Comanda alimentării serviciilor auxiliare se poate realiza numai după închiderea manuală a întrerupătorului 60.1.

După închiderea întrerupătorului 60.1 se poate acționa întrerupătorul 201.6, de pe pupitrul de comandă, care comandă alimentarea bobinei contactorului 60.2. Contactorul 60.2 este acționat numai în cazul cînd contactul releului intermediar pentru releul de minimă tensiune 154.15 este închis, cînd separatorul pentru circuite trifazate 195 este pe poziția „Conectat", comutatorul de probă pentru ventilul de aerisiere pantograf 148.1 este pe poziția „Normal" și releul maximal de curent pentru serviciile auxiliare 153.8 este închis.

Comutatorul 75.5 trebuie să fie asemenea pe poziția „Normal" ca să asigure alimentarea cu curent alternativ 220 V, 50 Hz bobinele contactoarelor 66.2—4 și 70.5—8.

După închiderea contactorului 60.2 se conectează prin unul din contactoarele 66.2—4 alimentarea transformatorului de stabilizare 66.1. Închiderea contactoarelor 66.2—4 este comandată de un regulator electronic, care conectează alimentarea uneia dintre bobinele contactoarelor în funcție de tensiunea din linia de contact.

Pornirea convertizorului *ARNO* este întîrziat cu ajutorul releului temporizat cu mecanism de ceasornic 156.1.

Releul 156.1 conectează alimentarea bobinei contactorului 70.5, contactor care prin contactul său din circuitul de forță conectează condensatorul 70.2 pentru pornirea convertizorului *ARNO*.

Prin unul din contactele auxiliare *ND* contactorul 70.5 conectează alimentarea bobinei contactorului 70.6, care prin contactele sale din circuitul de forță conectează tensiunea la bornele convertizorului *ARNO*.

După atingerea unei turații suficient de mari, de convertizorul *ARNO*, releul tip *ALNICO*, 70.9, va deconecta alimentarea bobinei contactorului 70.5, care prin unul din contactele sale auxiliare *NI* închide alimentarea bobinei contactorului 70.7, care prin contactele sale din circuitul de forță șuntează rezistența de pornire 70.3.

Contactorul 70.7 prin unul din contactele sale auxiliare *ND* conectează alimentarea bobinei contactorului 70.8 care prin contactele sale din circuitul de forță conectează convertizorul *ARNO* la rețeaua consumatorilor.

În cazul alimentării serviciilor auxiliare de la sursa exterioară $3 \times 380$ V, 50 Hz, comutatorul pentru ventilul de aerisire pantograf 148.1 va fi pe poziția „Probă", separatorul pentru circuite trifazate 195 va fi pe poziția

„Normal", iar comutatorul 75.5 va fi pe poziția „Probă". Este necesară în cazul alimentării consumatorilor serviciilor auxiliare de la sursa exterioară și alimentarea consumatorilor de 220, 50 Hz în caz contrar nefiind posibilă comanda contactoarelor cu bobinele de acționare în curent alternativ.

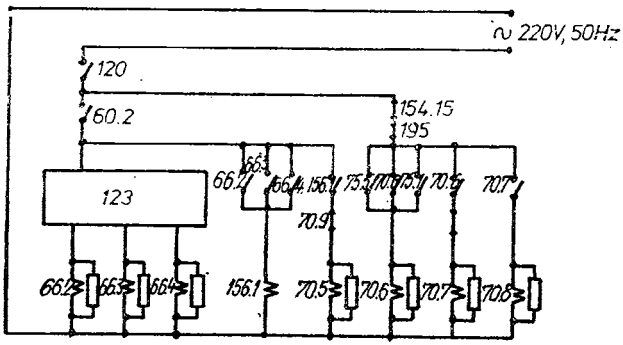



*Fig. 8.11.* Schema electrică de comandă pentru serviciile auxiliare: 66.2-4 — contactoare pentru transformator de stabilizare 70.5-8 — contactoare pentru grup Arno și conectare consumatori la Arno; 70.9 — releu tip Alnico; 120 — întrerupător automat; 123 — regulator electronic; 154.15 — releu de minimă tensiune; 156.1 releu temporizat cu mecanism de ceasornic; 195 — separator pentru circuite trifazate.

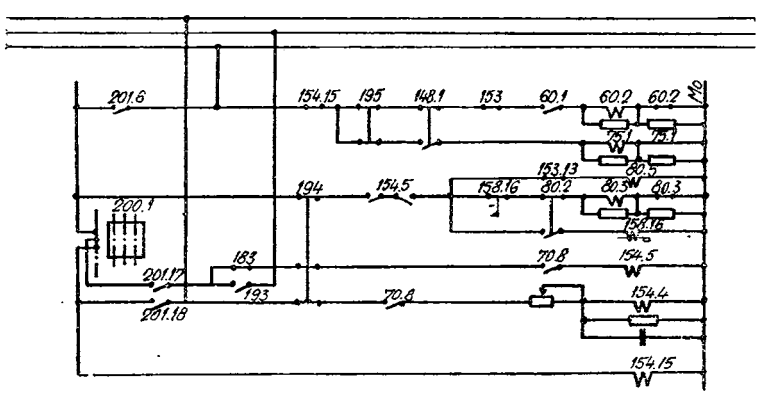



*Fig. 8.12.* Schema electrică de comandă pentru serviciile auxiliare; 60.2 — contactor servicii auxiliare; 75.1 — contactor alimentare servicii auxiliare de la sursa exterioară 3×380 V, 50 Hz; 80.2 — întrerupător automat; 80.3 — contactor pentru motor compresor; 80.5 — releu maximal de curent; 148.1 — comutator probă pentru ventil aerisire pantograf; 154.4 — releu temporizat; 154.5 — releu auxiliar pentru releul de presiune compresor; 154.15 — releu de minimă tensiune; 158.16 — releu de semnalizare; 183 — releu de presiune pentru compresor; 194 — separator curent de comandă; 195 — separator pentru circuite trifazate; 200.1 — controler; 201.6 — întrerupător comandă servicii auxiliare; 201.17 — întrerupător comandă compresor; 201.18 — întrerupător comandă ventilatoare.

Avînd condiţiile de mai sus satisfăcute se poate comanda prin întrerupătorul 201.6 alimentarea bobinei contactorului 75.1, care prin contactele sale din circuitul de forţă conectează tensiunea 3 × 380 V, 50 Hz.

Prin contactul său auxiliar *ND* contactorul 75.1 închide alimentarea bobinei contactorului 70.6, care prin contactul său din circuitul de forţă conectează tensiunea la bornele convertizorului *ARNO*.

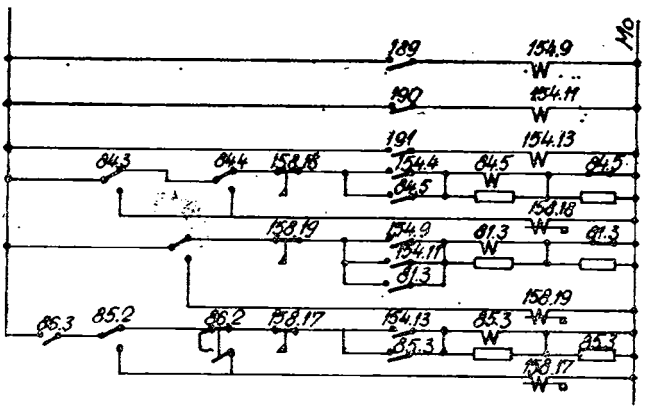



*Fig. 8.13.* Schema electrică de comandă pentru serviciile auxiliare: 81.2 — întrerupător automat; 61.3 — comutator pentru motor ventilator self; 84.3 — 4 — întrerupătoare automate; 84.5 — contactor pentru motoare ventilatoare redresoare; 85.2 — întrerupător automat; 85.3—contactor pentru motoare pompă de ulei şi ventilator trafo; 86.2 — întrerupător automat; 86.3 — termostat; 154.9 — 13 — relee auxiliare pentru relee de presiune ventilatoare; 58.17-19 — releu de semnalizare; 189 — 191 — releu de presiune pentru ventilatoare.

Convertizorul *ARNO* în cazul alimentării de la o sursă exterioară va funcţiona în regim de motor pentru antrenarea generatorului sincron 71.1.

Contactorul 70.6 prin unul din contacte auxiliare *ND* conectează alimentarea bobinei contactorului 70.7, care prin contactul său din circuitul de forţă şuntează rezistenţa de pornire.

Procesul de închidere în continuare a contactoarelor se repetă în aceeaşi succesiune ca şi în cazul alimentării serviciilor auxiliare de la înfăşurarea 10.7 al transformatorului principal.

După închidere contactorul 70.8 închide contactele sale *ND* din circuitele releului de presiune al compresorului 154.5, respectiv al releului temporizat 154.4 pentru pornirea motoarelor ventilatoarelor.

Pentru închiderea circuitelor bobinei contactorului 80.3 pentru motorul compresorului, releului auxiliar de presiune compresor 154.5 şi releului temporizat pentru pornirea motoarelor ventilatoarelor 154.5 este necesar ca separatorul pentru curentul de comandă 194 să fie pe poziţia „Conectat" sau „Pornire deconectat".

Prin întrerupătorul de comandă 201.17 se închide circuitul de alimentare pentru releul auxiliar al releului de presiune compresor, care prin contactul său *ND* închide alimentarea bobinei de acţionare al contactorului 80.3, care prin contactele sale din circuitul de forţă conectează alimentarea motorului pentru compresor.

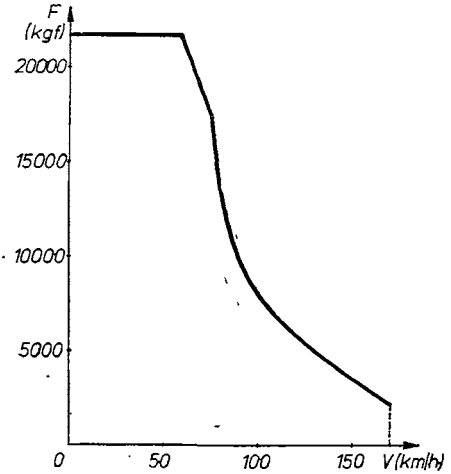



*Fig. 8.14.* Caracteristica de tracțiune TEA (C.F.R.).

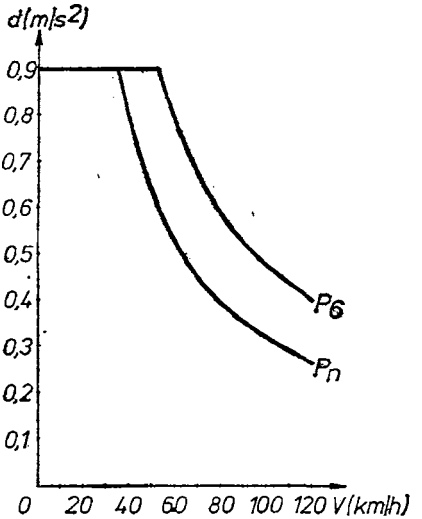



*Fig. 8.15.* Caracteristica decelerației: $P_n$ = 2100 kW puterea nominală; $P_6$ = = 3 000 kW de scurtă durată (1 min), ca puteri de frînare.

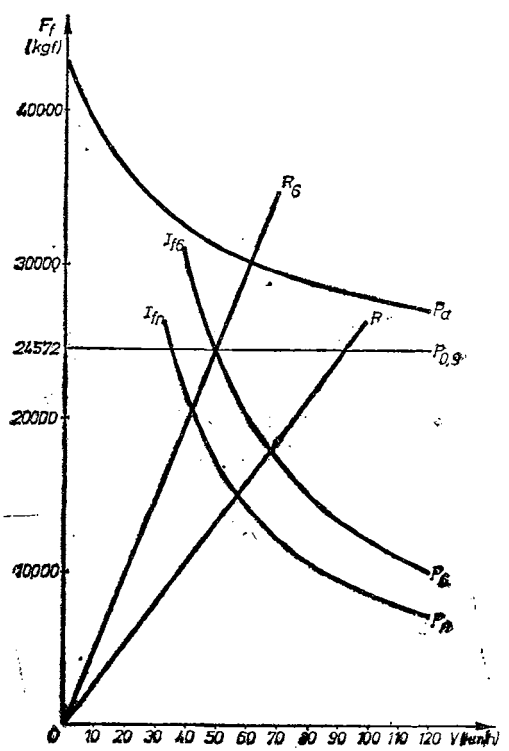



*Fig. 8.16.* Caracteristica de frînare, pentru regimurile puterilor de frînare ca în figura 8.15.

Cu întrerupătorul de comandă 201.18 se comandă alimentarea releului temporizat 154.5 pentru pornirea motoarelor ventilatoarelor.

Releul 154.4 prin contactul său *ND* conectează alimentarea bobinei contactorului 84.5, care prin contactele sale din circuitul de forță conectează alimentarea pentru motoarele ventilatoarelor redresoarelor.

Releele auxiliare de presiune pentru ventilatoarele redresoarelor 154.9 și 154.11 prin contactele lor *ND*, conectează după pornirea motoarelor ventilatoarelor redresoarelor, alimentarea bobinei contactorului 81.3, care prin contactele sale din circuitul de forță conectează alimentarea motorului pentru ventilatorul selfului de aplatisare.

Alimentarea bobinei contactorului 85.3, care conectează alimentarea pentru motorul pompei de ulei și pentru motorul ventilatorului pentru transformator, este conectată de releul auxiliar de presiune 154.13, după pornirea motorului ventilatorului pentru selful de aplatisare.

Mersul motorului pompei de ulei și al motorului pentru ventilatorul transformatorului este comandat de termostatul 86.3, care întrerupe alimentarea bobinei contactorului 85.3 pentru temperaturi sub $+35°C$.

Întreruperea alimentării motoarelor serviciilor auxiliare la suprasarcini sau la scurtcircuite este semnalizată de releele de semnalizare 158.16—19.

Serviciile auxiliare de pe rama electrică sînt prevăzute cu comandă multiplă pentru a permite comanda dintr-o singură cabină de comandă.

8.3.6. **Performanțe.** Caracteristica de tracțiune a *TEA* cu cele 16 motoare în funcțiune este redată în figura 8.14. Caracteristica decelerării calculată pentru diverse regimuri de putere este reprezentată în figura 8.15. Caracteristicile de frînare reostatică sînt trasate în diagrama din figura 8.16.

## 8.4. RAMA ELECTRICĂ SERIA E.T.420 (CĂILE FERATE R.F.G.)

Principalele date caracteristice sînt cuprinse în tabelul 8.1, la care se adaugă următoarele:

| | |
|---|---|
| — puterea specifică | 16 kW/t |
| — forța de tracțiune la demaraj | 18000 kp |
| — forța de frînare (în domeniul vitezelor mari și mijlocii) | 16000 kp |
| — echipamente electrice | 2 t |
| — motoare de tracțiune | 2 × 6 |
| — greutatea în serviciu (fără călători) | 138 t |
| — greutatea părții electrice | 53 t |
| — sarcina pe osie (max.) | 16 t |
| — diametrul roții motoare nou/uzat | 850/780 mm |
| — locuri pe bănci (cl. 1—33; cls. 2—161) | 194 |
| — locuri în picioare cu 4 pers/m$^2$ | 254 |
| — locuri în picioare cu 6 pers/m$^2$ | 381 |

Ansamblul, cu indicarea dimensiunilor principale, este redat în figura 8.17, iar în figura 8.18 s-a prezentat dispoziția generală (amplasamentul) a echipamentului principal.

În scopul folosirii întregului spațiu din vagoane pentru călători, tot echipamentul este plasat sub șasiul vagoanelor în cutii etanșe, așa cum se poate observa în figura 8.19 și fig. 8.20.

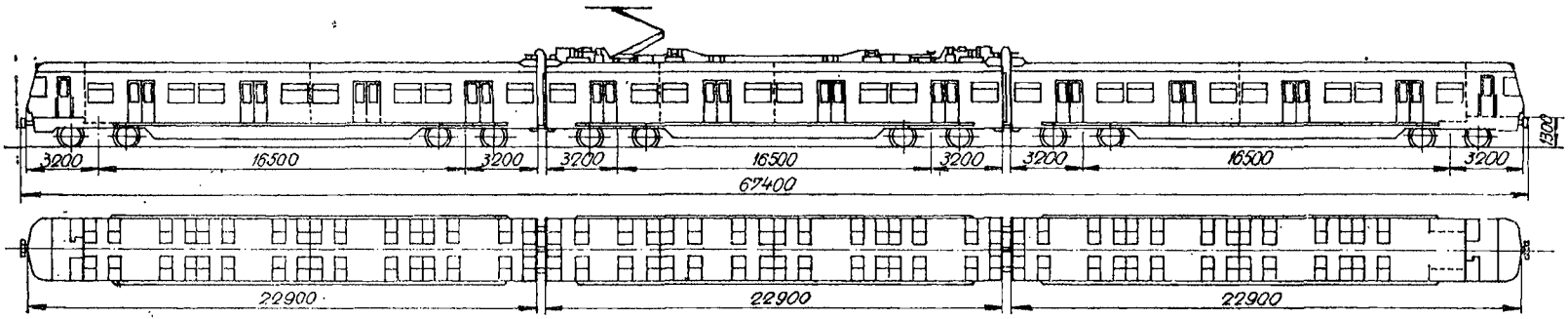



*Fig. 8.17.* Rama electrică RT 420 — ansamblul.

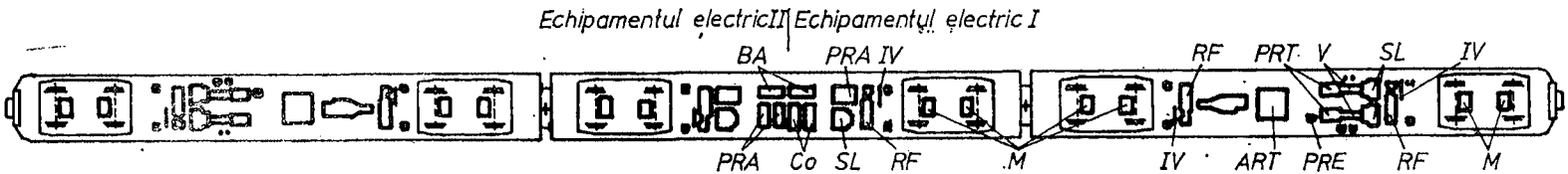



*Fig. 8.18.* Dispoziția generală a echipamentului principal : *BA* — bateria de acumulatoare 110 V (pentru ambele echipamente) ; *T* — transformatorul principal ; *ART* — agregat pentru răcirea transformatorului ; *PRT* — redresorul principal (pentru tracțiune) ; *M* — motoarele de tracțiune ; *IV* — inversorul de mers ; *SL* — self de aplatisare ; *PRA* — redresor auxiliar (pentru servicii auxiliare) ; *PRE* — redresor pentru excitație ; *Co* — compresoare ; *V* — ventilatoare ; *RF* — rezistențe de frînare.

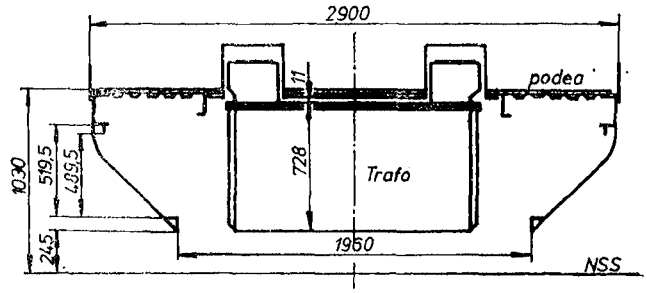



*Fig. 8.19.* Secțiune transversală schematică printr-un vagon.

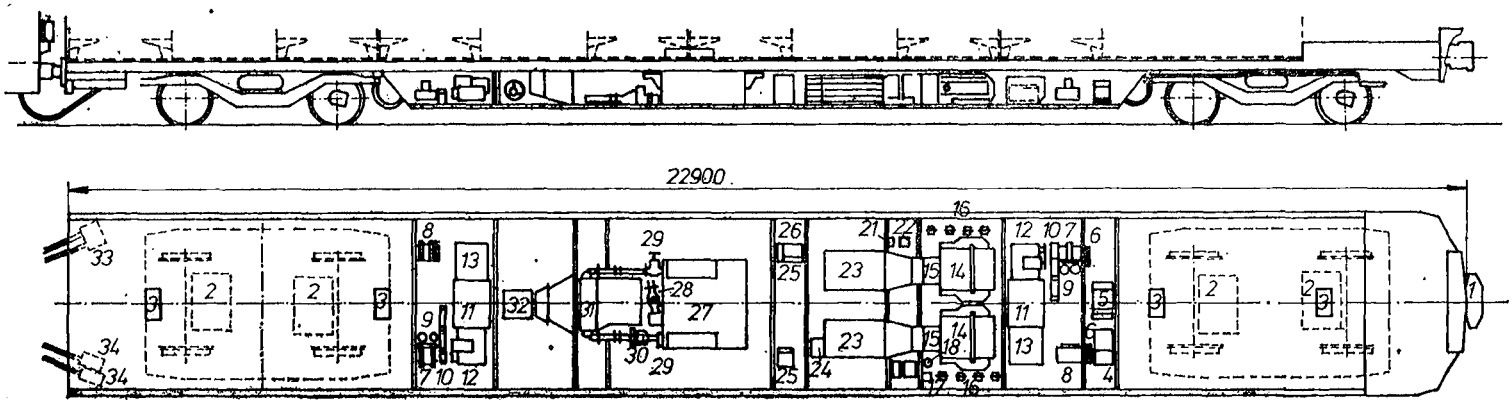



*Fig. 8.20.* Amplasarea echipamentului electric sub șasiul vagonului de capăt: *1* — cupla automată Schafenberg; *2* — motor de tracțiune; *3* — cutie de conexiuni pentru cablele motoarelor; *4* — redresor; *5* — filtru *L*, *C* pentru redresor.

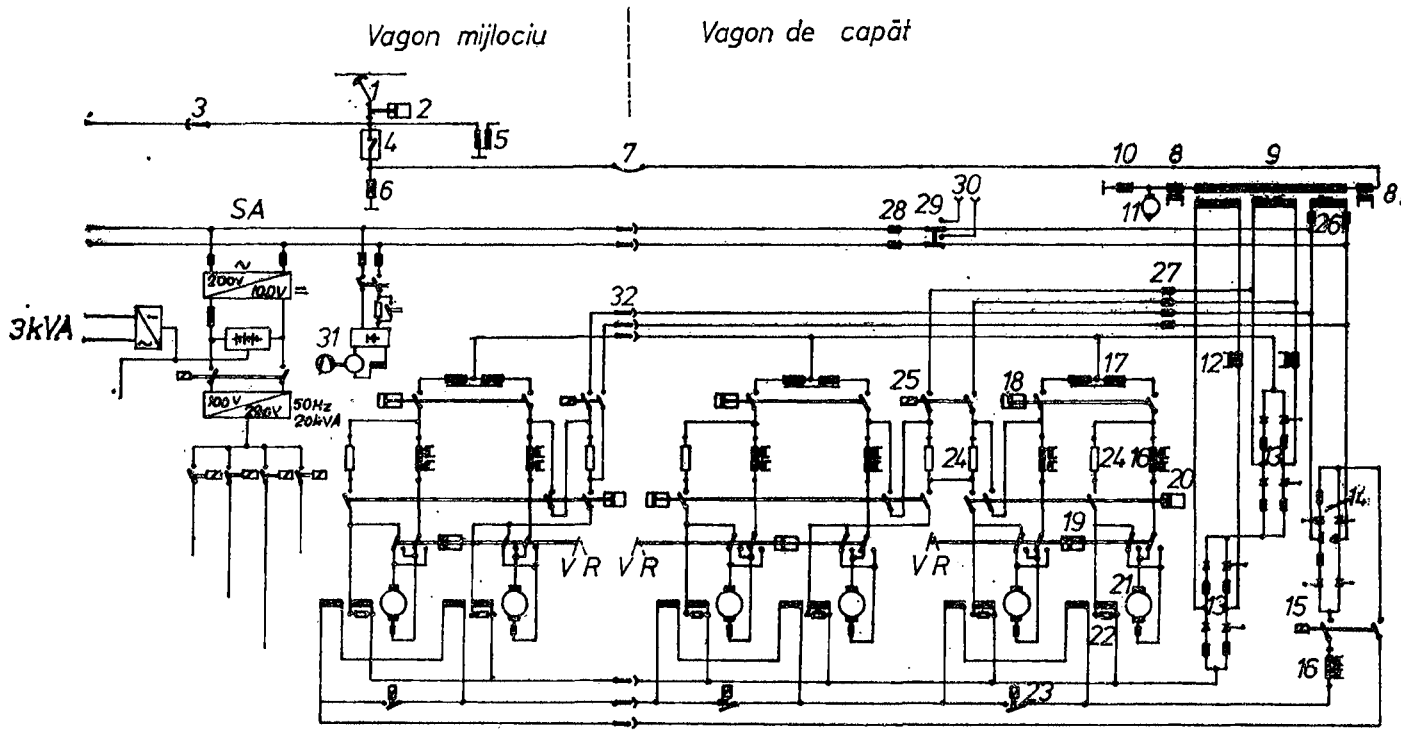



*Fig. 8.21.* Schema circuitului principal de forță în regim de tracțiune și frînare: *1* — pantograf; *2* — separator pentru pantograf; *3* — separator de acoperiș; *4.* — întrerupător principal; *5* — transformator de tensiune; *6* — descărcător; *7* — cuplă de înaltă tensiune; *8* — transformator de curent; *9* — transformator; *10, 11* — bobină și contact de legare la pămînt; *12* — transformator de curent; *13* — redresorul principal; *14* — redresor de excitație (alimentarea înfășurărilor de excitație separată a motoarelor); *15* — contactor pentru excitație; *16* — șunt pentru curent; *17* — self de aplatisare (unul pentru cele două motoare ale aceluiași boghiu); *18* — contactor pentru motor; *19* — inversor de mers; *20* — contactor de frînare; *21* — motoare de tracțiune; *22* — rezistență de șuntare permanentă a excitației; *23* — contactor pentru interconectarea excitațiilor; *24* — rezistență de frînare; *25* — contactor pentru încălzire; *26, 27, 28* — siguranțe; *29, 30* — contactor și priză pentru probe; *31* — compresor; *32* — cuplaj electric

Schema circuitului principal de forță în regim de tracțiune și frînare este redată în figura 8.21, unde s-a prezentat și specificația echipamentului mai important. Așa cum rezultă din figura 8.18 și din datele caracteristice prezentate mai sus rama ET 420 are două echipamente energetice identice amplasate fiecare în jumătate din vagonul mijlociu și un vagon de capăt. În caz de avarie a unui echipament, rama poate circula cu jumătate putere. Schema din figura 8.21 corespunde pentru un echipament energetic.

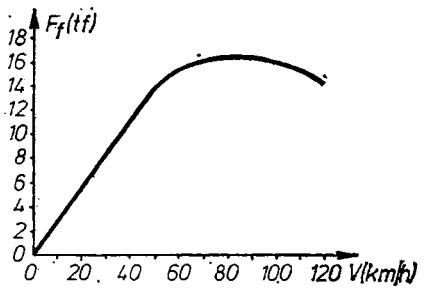


*Fig. 8.22.* Caracteristica de frînare reostatică.

Motorul de tracțiune este cu excitație mixtă (serie-separată) și caracteristică anticompund. Alimentarea motoarelor(21 se face de la redresor (13) alcătuit din două punți tiristorizate mixte înseriate. Alimentarea înfășurărilor de excitație separate (înseriate între ele) se face de la redresorul de excitație (14) alcătuit dintr-o punte complet tiristorizată.

În regim de frînă electrică reostatică, motorul de tracțiune devine generator cu excitație separată (excitația serie se deconectează), iar indusul debitează pe o rezistență de valoare fixă (24). Reglarea frînării se face prin variația curentului de excitație (reglarea tiristoarelor punții 14) astfel ca $I_{excit} + I_{rotor} =$ = const. pe intervalul de viteze 120—55 km/h, iar de aici pînă la $V = 0$ intră în acțiune frîna pneumatică, rezultînd caracteristica de frînare ca în diagrama din figura 8.22.

*Comanda și reglarea.* În figura 8.23 s-a prezentat schema-bloc de principiu pentru comandă și reglare în regim de mers, iar semnificația blocurilor este trecută în legenda figurii. Soluția adoptată este aceea care se folosește în general în exploatarea ramelor electrice, adică reglarea la curent impus (respectiv forță de tracțiune) atît în regim de mers cît și în regim de frînare. Valoarea impusă curentului se afișează cu ajutorul comutatorului mers/frînă (4) și prin blocurile respective se transformă în impulsuri. Valoarea efectivă a curentului (bucla de reglare a curentului indusului) intră în instalație prin blocul respectiv (18) se transformă în impulsuri, se compară cu cele ale curentului impus rezultînd semnalul de acționare (care se amplifică — poz. 27) a sistemului de reglare (25) care lucrează asupra punților tiristorizate (reglarea unghiului de deblocare) rezultînd variația tensiunii de la $U_d = 0$ la $U_{d.max}$.

În regim de frînare reglarea la curent de frînare impus se realizează similar ca mai sus, însă pe bucla reglării curentului de excitație furnizat de redresorul de excitație.

*Serviciile auxiliare.* Alimentarea agregatelor serviciilor auxiliare (compresor, ventilatoare, pompă răcire ulei trafo ...) se face în curent alternativ trifazat 50 Hz 3 × 220 V, iar convertirea mono-trifazată se obține cu ajutorul unui convertizor static mono-trifazat cu treaptă intermediară de curent continuu (poz. *SA* din fig. 8.21); compresorul (poz. 31) este antrenat de un motor de curent continuu alimentat de la un redresor propriu. O priză de 24 V c.c. este luată de pe bateria de acumulatoare (care lucrează în tampon pe circuitul 110 V c.c.) pentru alimentarea circuitelor de comandă, iluminat de siguranță, instalația radio-telefon, SIFA, Indusi ...

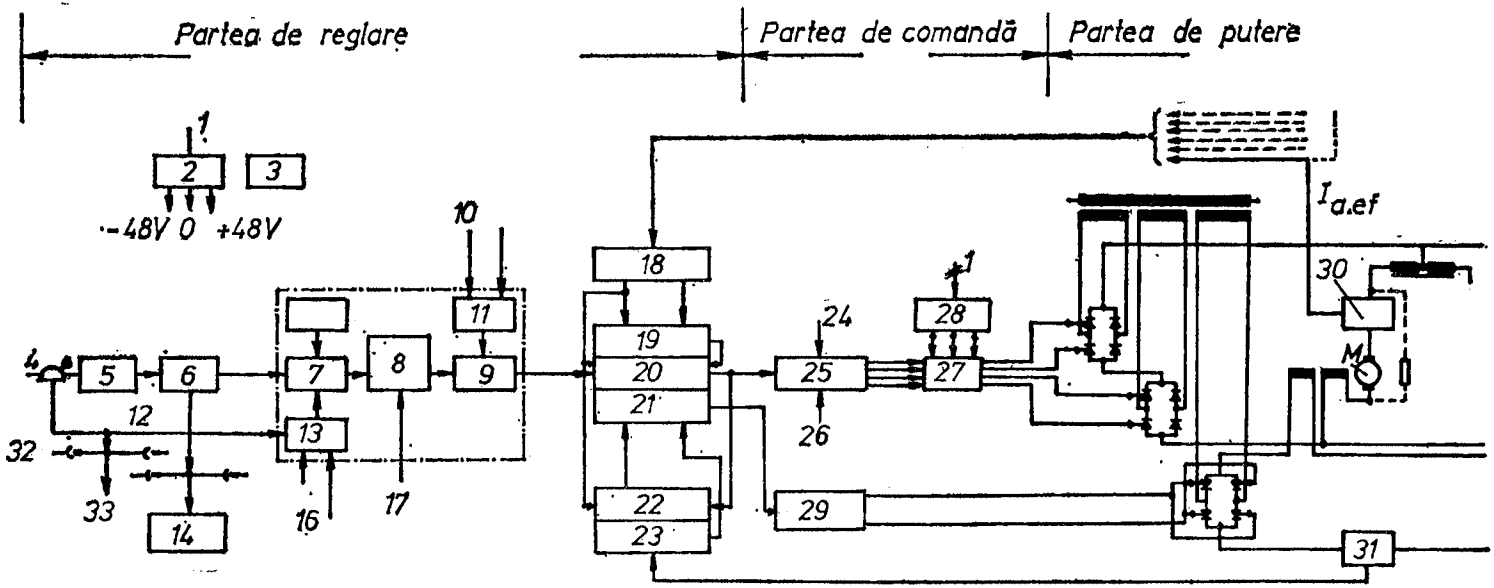



*Fig. 8.23.* Schema-bloc pentru comandă și reglarea în regim de tracțiune: *1* — grup trafo-redresor auxiliar 3 kVA-220V — 50 Hz, reglat; *2* — sursa de tensiune; *3* — ventilator; *4* — comutator mers/frînă; *5* — dispozitiv de afișare a curentului impus; *6* — transformarea curentului impus în impulsurî; *7* — limitarea valorii impuse; *8* — transformarea valorii impuse mers/frînare; *9* — integratorul curentului impus; *10* — tensiunea liniei de contact/tensiune baterie, prea mică; *11* — blocarea valorii impuse; *12* — valoarea impusă de avarie; *13* — valoarea maximă impusă la mers cu avarie; *14* — intrarea valorii impuse de la cealaltă instalație; *15* — lipsă ventilație; *16* — amplificator de impulsuri; *17* — valoarea impusă pentru frînare; *18* — intrarea curentului efectiv al rotorului; *19* — comparatorul devierilor limită; *20* — regulatorul curentului rotoric — comparator;; *21* — regulatorul curentului de excitație — comparator; *22* — regulatorul reducerii cîmpului; *23* — intrarea curentului efectiv de excitație; *24* — adaos de impuls, blocarea de impuls; *25* — generator de impulsuri pentru redresorul curentului rotoric; *26* — sincronizare; *27* — amplificator de impuls; *28* — alimentator de tensiune pentru amplificatorul de impulsuri; *29* — generator de impulsuri pentru redresorul curentului de excitație; *20, 31* — captatorul curentului rotoric, respectiv a curentului de excitație; *32* — circuitele de comandă; *33* — valoarea de avarie impusă a celeilalte instalații.

Motorul de tracțiune folosit pe ramă este tipul ABS 370 avînd următoarele date caracteristice:

— puterea nominală (de durată) . . . . . 200 kW
— tensiune nominală . . . . . 650 V
— curent nominal . . . . . 335 A
— turația nominală . . . . . 1 820rot/min
— grad de reducere a cîmpului ($\psi$) . . . . . $\psi$ = 0,41.

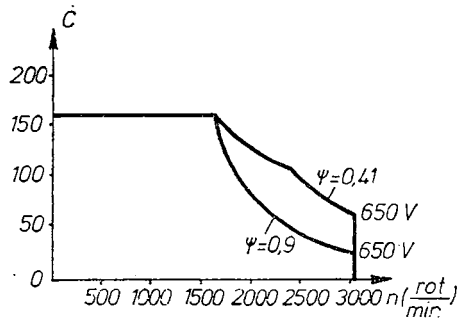



*Fig. 8.24.* Caracteristica mecanică $C(n)$ a motorului ABS—370.

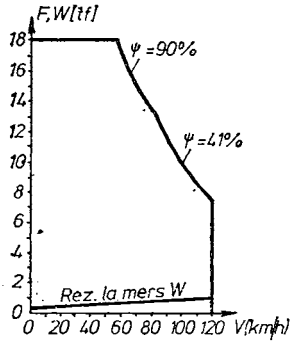



*Fig. 8.25.* Caracteristica de tracțiune a ramei ET—420.

Caracteristica mecanică $C(n)$ a motorului ABS 370 este redată în figura 8.24, iar în figura 8.25 s-a trasat caracteristica de tracțiune a ramei (pentru 12 motoare).

## 8.5. ELEMENTE DE CALCUL PRIVIND PERFORMANȚELE RAMELOR ELECTRICE

Toate elementele de calcul prezentate pentru locomotivele de curent monofazat 50 Hz cu redresoare sînt, evident, valabile și pentru ramele electrice ale aceluiași sistem de tracțiune.

Caracteristica de tracțiune $F(V)$ se calculează și trasează cu aceeași metodologie și ea servește la calculul și trasarea caracteristicei accelerației $a(V)$.

Curba $a(V)$ se calculează și trasează pornind de la ecuația de mișcare a trenului:

$$F_m - W_R = (1 + \gamma)\frac{G_R}{g}a, \text{ de unde:}$$

$$a = \frac{F_m - W_R}{(1 + \gamma)G_R} \cdot g,$$

în care:

$W_R$ este rezistența totală la mers a ramei și se poate calcula cu relația $W_R = r_R G_R$, iar rezistența specifică la rulare cu relația:

$$r_S = 1{,}386 + 0{,}026\ V + 0{,}0031\ V^2\ \text{kgf/t (c.f. U.R.S.S.)};$$

$G_R$ — greutatea totală a ramei;
$F_m$ — forța motoare la obadă se ia din caracteristica $F(V)$;
$1 + \gamma$ este factorul de masă, care se poate adopta 1,08 pentru calcule practice.

Pentru calculul și trasarea *curbei decelerației* $d(V)$ se poate folosi relația:

$$d = \frac{9{,}81(f_f + r_t)}{1000\,(1 + \gamma)} \text{ m/s}^2,$$

$f_f$ este forța specifică de frînare;
$r_t$ — rezistența specifică la rulare.

*Puterea de frînare* pentru menținerea vitezei $V$ pe o pantă $i‰$ rezultă cu relația:

$$P_f = \frac{(1 + \gamma)\, m_R i V}{367} \text{ kW},$$

$m_R$ este masa ramei.

Inductanța selfului de aplatisare ce se înseriază cu motorul de tracțiune pentru obținerea unui coeficient de ondulație $\beta = 0{,}3$ se poate stabili orientativ cu relația:

$$L_d = 0{,}66 \frac{U_d}{\beta\omega\, I_d} \text{ mH},$$

$U_d$ este tensiunea medie redresată;
$I_d$ — curentul mediu redresat;

$$\omega = 2\pi f = 314 \text{ rad/sec}.$$

Cu relația de mai sus se poate trasa și $L_d(I_d)$.

Puterea electromagnetică a mașinilor, în regim de generator și la regimul nominal:

$$P_{e(n)} = \frac{m\, U_n I_n}{1000} \text{ kW } (m \text{ — numărul mașinilor}).$$

Puterea electromagnetică raportată la obadă:

$$P_{0(n)} = \frac{P_{e(n)}}{\eta_{em}\, \eta_t} \text{ kW},$$

$\eta_{em}$ este randamentul electromagnetic al mașinilor;
$\eta_t$ — randamentul angrenajului.
Pentru calcule practice $\eta_{em}\, \eta_t = 0{,}915$.
Forța de frînare, la obadă pentru regimul nominal:

$$F_{f(0)} = \frac{367\, P_{0(n)}}{V} \text{ kgf}.$$

Pentru stabilirea *forței de tracțiune, respectiv a forței de frînare, limitată de aderență* și la rame electrice coeficientul de aderență (ca valori medii) se poate calcula cu relația *Curtius-Kniffler:*

$$\varphi = \frac{7{,}5}{V + 44} + 0{,}161$$

sau

$$\varphi = 0{,}175 \, \frac{8 + 0{,}1\, V}{8 + 0{,}2\, V} \, .$$

Forța de frînare limitată de aderență:

$$F_a = 1000 \, \varphi \, G_R;$$

$G_R$ — greutatea aderentă a ramei.

Forța de frînare limitată de decelerația maximă *(d):*

$$F_{f(d)} = (1 + \gamma) \, m_R \cdot d;$$

$$m_R = \frac{1000 \, G_R}{9{,}81} \text{ kg, este masa ramei.}$$

Puterea de frînare limitată de aderență:

$$P_a = \frac{F_a V}{367} \text{ kW.}$$

Puterea de frînare limitată de decelerația maximă:

$$P_{(d)} = \frac{F_{f(d)} \, V}{367} \text{ kW.}$$

Spațiul de frînare:

$$S_f = \sum \frac{4{,}17 \, (V_i^2 - V_s^2)}{f_r + r_t} \, m.$$

Timpul de frînare:

$$t_f = \sum \frac{30 \, (V_i - V_s)}{f_f + r_t} \text{ sec.}$$

Pentru exactitate mai mare se adoptă intervale de viteze de cîte 10 km/h, începînd de la $V_{max}$.

## Capitolul 9

# PROBLEME ACTUALE PRIVIND CONSTRUCȚIA, REGLAREA ȘI ÎNCERCAREA LOCOMOTIVELOR ELECTRICE

## 9.1. TENDINȚE ACTUALE PRIVIND CONTRUCȚIA PĂRȚII MECANICE A LOCOMOTIVELOR ELECTRICE PE ȘASE OSII (FORMULA OSIILOR Bo-Bo-Bo)

9.1.1. **Generalități** În condițiile sporirii vitezelor de circulație la trenurile de călători pe profile ușoare cît și la cele cu tonaj mare pe profile grele din considerente de putere instalată (putere mare ce nu poate fi repartizată numai pe patru osii), este necesară locomotiva pe șase osii.

Pentru a putea remorca trenuri de marfă cu tonaje mari în simplă tracțiune pe profile grele, locomotiva cu șase osii se impune din considerente de greutate aderentă.

Pînă în ultima perioadă, locomotivele pe șase osii se realizau numai în formula osiilor *Co—Co* (două boghiuri a trei osii în boghiu), care în condițiile enunțate mai sus conduc la două neajunsuri mai importante:

— limitarea vitezei de circulație la plafoane joase în curbe cu raze mici (de exemplu 70 km/h în cursă $R = 300$ m), din cauza forțelor de ghidare mari la trecerea prin curbe;

— uzură mare a bandajelor roților și șinelor (o problemă de exploatare, extrem de dificilă), din cauza ampatamentului mare a boghiului $C_0$.

Aceste neajunsuri se pot înlătura, în mare măsură, folosind pentru locomotive pe 6 osii formula osiilor *Bo—Bo—Bo* (3 boghiuri a două osii motoare). Locomotive diesel-electrice și electrice de tip *Bo—Bo—Bo* sînt deja realizate mai de mult la unele administrații de cale ferată (Italia, Japonia ...) ,însă în ultima vreme ORE (Oficiul de cercetări și încercări al U.I.C.ului) în colaborare cu C.F.-elvețiene au efectuat numeroase încercări și măsurători în exploatare pe linia Luzern-Lugano (cca 200 km) la mijlocul căreia se află cunoscutul tunel Saint-Gothard (cca 20 km), cu patru prototipuri de locomotive electrice *Bo—Bo—Bo* construite de SLM* (partea mecanică) și BBC** (partea electrică). Ca locomotive de referință au fost luate tipurile $A_e6/6$ (formula osiilor *Co—Co*) și $R_e$ 4/4 (formula osiilor *Bo—Bo*) care fac serviciul pe aceeași linie.

Se face mențiunea că liniile magistrale C.F.R. care traversează Carpații (Brașov — Cîmpina, Craiova — Caransebeș, Filiași—Simeria, Adjud—Ciceu) au profilul asemănător (declivități, curbe) cu cel al liniei elvețiene Saint-Gothard, așa că rezultatele și concluziile, avînd ca obiect formula osiilor la locomotivele electrice, se potrivesc, în largă măsură și pentru căile noastre ferate.

---

* SLM — Schweizerische Locomotiv und Maschinenfabrik

** BBC — Brown Boveri C^ie

Caietul de sarcini elaborat în 1969 și care a generat concepția prototipurilor locomotivelor *Bo—Bo—Bo* (care poartă indicativul $R_e$ 6/6) cuprindea printre altele și următoarele condiții tehnice:

— sarcina pe osie 20 tf și greutatea totală a locomotivei 120 tf;

— forță de tracțiune corespunzătoare remorcării unui tonaj de 800 tf pe rampă de 26‰ (rezultă $F_{0,h}$ 27 tf și $\psi = 0{,}23$);

— viteză de 80 km/h pe rampele liniei Saint-Gothard (această condiție, la $F_0 = 27$ tf impune o $P_0 = 8000$ CP).

— limitarea forțelor dintre roată și șină la valori depășind foarte puțin pe cele dezvoltate de locomotive $R_e$ 4/4 (această condiție a influențat decisiv formula osiilor *Bo—Bo—Bo*).

— viteză maximă 140 km/h care să fie atinsă cu Q = 800 tf pe rampă 6,5‰ (această condiție determină $F_0 = 19$ tf și $P_0 = 9900$ C.P.).

În scopul menținerii la o valoare cît mai mică a forțelor care acționează asupra căii, măsurile principale constructive luate la locomotiva $R$ 6/6 sînt următoarele:

— greutatea nesuspendată cît mai mică;

— ampatamentul redus al boghiului; acesta conduce la forțe la buza bandajului și uzuri minime. Un boghiu cu ampatament $a = 2700$ mm (Bo) se înscrie liber într-o curbă cu $R = 300$ m, pe cînd unul cu $a = 4070$ mm (cazul $C_0$) necesită $R = 500$ m;

— legarea boghiurilor printr-un cuplaj transversal elastic pentru asigurarea unei înscrieri optime în curbe și pentru reducerea forțelor de ghidare;

— utilizarea de osii montate cu elasticitate laterală pentru reducerea forțelor dinamice în cazul unor abateri geometrice ale căii și în cazul demarajelor în rampă.

Alte măsuri pentru o mai bună utilizare a aderenței:

— transmiterea forței de tracțiune și frînare prin bare de tracțiune joase în scopul diminuării cabrajului și a echilibrării încărcării celor 3 boghiuri;

— utilizarea de nisipare la osiile externe ale locomotivei;

— instalarea unei frîne antipatinaj eficiente;

— măsuri speciale pentru repartizarea egală ca greutății cutiei pe cele 3 boghiuri (acestea se tratează mai jos).

Întrucît prototipurile locomotivelor *Re* 6/6 sînt realizări recente (1972) avînd la bază o tehnică nouă privind partea mecanică, în cele de mai jos se prezintă unele aspecte legate de construcția acestei locomotive.

9.1.2. **Datele caracteristice principale ale LE-Re-6 6 (Bo-Bo-Bo).** Parametrii constructivi principali sînt următorii:

— diametrul roții în stare nouă . . . . . 1260 mm
— raportul de transmitere al angrenajului . . . . . 33: 87
— forța de tracțiune max. la demaraj . . . . . 40.2 t.f.
— forța de tracțiune uniorară . . . . . 27,2 t.f.
— forța de tracțiune de durată . . . . . 24 tf.
— puterea uniorară (la $V = 105{,}6$ km/h) . . . . . 10600 CP
— putere de durată (la $V = 110{,}6$ km/h) . . . . . 9843 CP
— viteza maximă . . . . . 140 km/h
— forța de tracțiune la viteza maximă . . . . . .20 tf
— greutatea totală și aderența . . . . . 120 thf

— greutatea părții mecanice . . . . . 62,5 t.
— greutatea părții electrice . . . . . 57,5 t.
— felul curentului și tensiunea la pantograf: monof. 16 2/3 Hz, 15 kV.

9.1.3. **Cutia și boghiurile.** Două exemplare din locomotive (LE 11601 și 11602) au cutia realizată din două unități (cutie jumelată) care sprijină pe boghiul median, iar celelalte două unități (LE 11603 și 11604) au cutie unică,

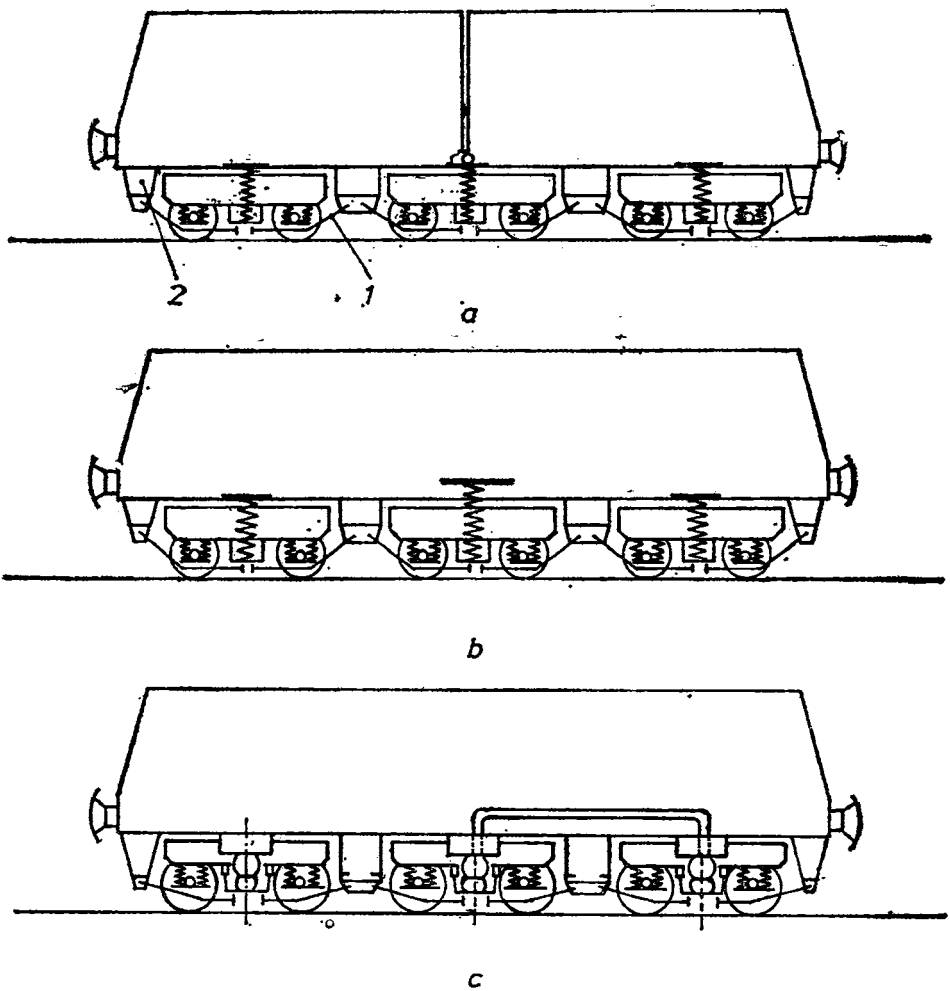



*Fig. 9.1.* Schema variantelor de realizare a cutiilor: *a* — cutie din două unități și suspensie secundară cu arcuri elicoidale; *b* — cutie monobloc cu suspensie secundară cu arcuri elicoidale; *c* — cutie monobloc și suspensie secundară pneumatică; *1* — bare de joasă tracțiune; *2* — suporții barelor de tracțiune.

însă una din ele (11603) are suspensia secundară realizată cu arcuri elicoidale și cealaltă cu suspensie pneumatică (11604). Dispoziția schematică a celor două tipuri de cutie este redată în figura 9.1.

Cele două unități de cutie (șasiul lor) sînt legate printr-o articulație specială care permite și transmiterea forței de tracțiune și deplasarea pe verticală, adaptîndu-se înălțimii poziției boghiului median și acționează ca o șarnieră orizontală. Schema acestei articulații este arătată în figura 9.2.

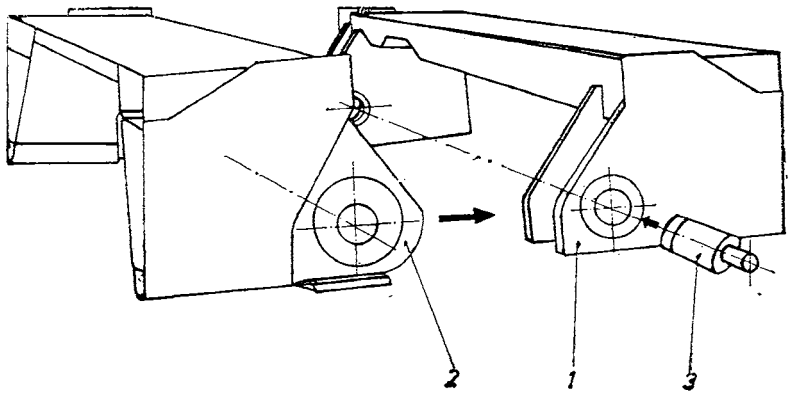



*Fig. 9.2.* Articulația dintre cele două unități de cutie.

Această articulație se găsește la nivelul tampoanelor. Unitatea nr. 1 are în prelungirea lonjeroanelor o furcă *1* în care intră prelungirea în formă de nas *2* a lonjeronului unității nr. 2. Legătura se face prin intermediul unui

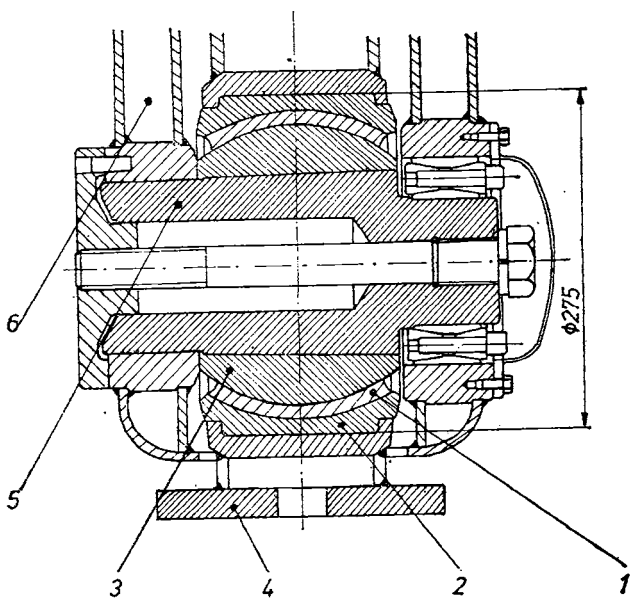



*Fig. 9.3.* Secțiune prin articulația de legătură dintre cele două unități ale cutiei.

bolț *3* situat orizontal, perpendicular pe axa longitudinală a locomotivei, În figura 9.3 este redată o secțiune prin articulație.

Aceasta este alcătuită ca un silent-bloc. Un element de cauciuc *1* de formă sferică legată între ele, elastic și silențios un inel interior *2* cu inel un exterior *3*.

Inelul exterior *3* aparține nasului *4* al unității nr. 2 a cutiei, iar inelul interior *2* este fixat pe un bolț *5* care la rîndul său este fixat în furca *6* a unității nr. 1 a cutiei. Mișcările relative ale unităților cutiei sînt asigurate de această articulație care lucrează fără zgomot și fără uzură.

Cutia locomotivei a fost supusă la forțe de compresiune axiale de 100 tf, aplicate la locașurile tampoanelor și de 200 tf. aplicate în mijlocul traversei de șoc. Nu s-au produs deformații remanente.

Inconvenientul cutiei jumelate constă în numeroasle legături pneumatice și electrice și prevederea unui sistem de etanșare între cele două unități.

Cutia unică, din cauza lungimii sale mari, momentele încovoietoare la care este supusă evident fiind corespunzător mai mari, a impus întărirea longeroanelor și a pereților în zona acoperișului. Arcurile boghiului median au o caracteristică moale, astfel încît în cazul variației înălțimii acestuia față de valoarea medie, să influențeze în mică măsură repartiția greutății cutiei unice pe cele 3 boghiuri.

Boghiurile sînt legate între ele printr-o acuplare scurtă (fig. 9.4.) care asigură circulația în curbă cu un unghi de atac mic al osiilor conducătoare, reducînd valoarea forțelor de atac dintre roată și șină. Pe traversele frontale interioare ale boghiurilor extreme *I* și *III* se află fixate articulat, cu posibilitate de oscilare în jurul unor axe orizontale transversale, triunghiurile de ghidare *1* și *2* (funcționînd ca oiști). Triunghiurile de ghidare, îndreptate cu vîrfurile unul spre celălalte, sînt legate articulat prin bare de levierele barei *5*, fixată cu posibilități de rotire pe unul din lonjeroanele boghiului central *II*.

Triunghiul de ghidare *1* este legat de bara *5* prin intermediul oalei cu resort *3*, iar triunghiul *2* prin intermediul barei simple *4*. Rotirea boghiurilor extreme la circulația prin curbe este posibilă datorită rotirii barei *5* și elasticității asigurate de oala cu resort. Resortul are o tensiune inițială astfel că intră în funcțiune abia la stingerea unei anumite forțe. Sistemul lucrează practic fără uzură.

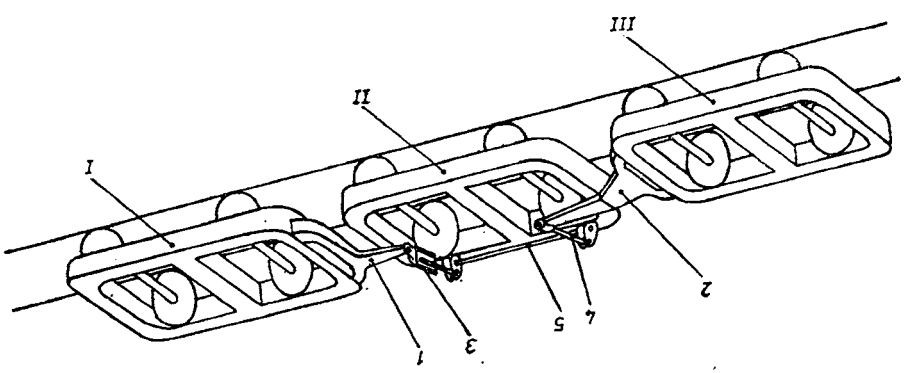



*Fig. 9.4.* Schema cuplelor transversale dintre boghiuri.

Articulațiile barei transversale *4*, lagărele barei *5* și ale oalei cu resort funcționează fără uzură, fiind prevăzute cu garnituri din material plastic.

Cutia reazemă pe fiecare boghiu prin intermediul a cîte patru pendule, cîte două de fiecare parte a locomotivei (fig. 9.5). Greutatea cutiei locomotivei se transmite prin intermediul resorturilor spirale *3* și al suporturilor de arc *5*

la traversa dansantă *4*, de la care se transmite mai departe prin pendulele *6* la cadrul boghiului *7*. Traversa dansantă se poate deplasa numai într-un plan perpendicular pe axa longitudinală a locomotivei. Prin aceasta resorturile elicoidale sau arcurile pneumatice sînt solicitate numai la comprimare. Pentru amortizarea mișcării de legănare a locomotivei este prevăzută montarea unor stabilizatoare, urmînd ca experiența să confirme utilitatea acestora.

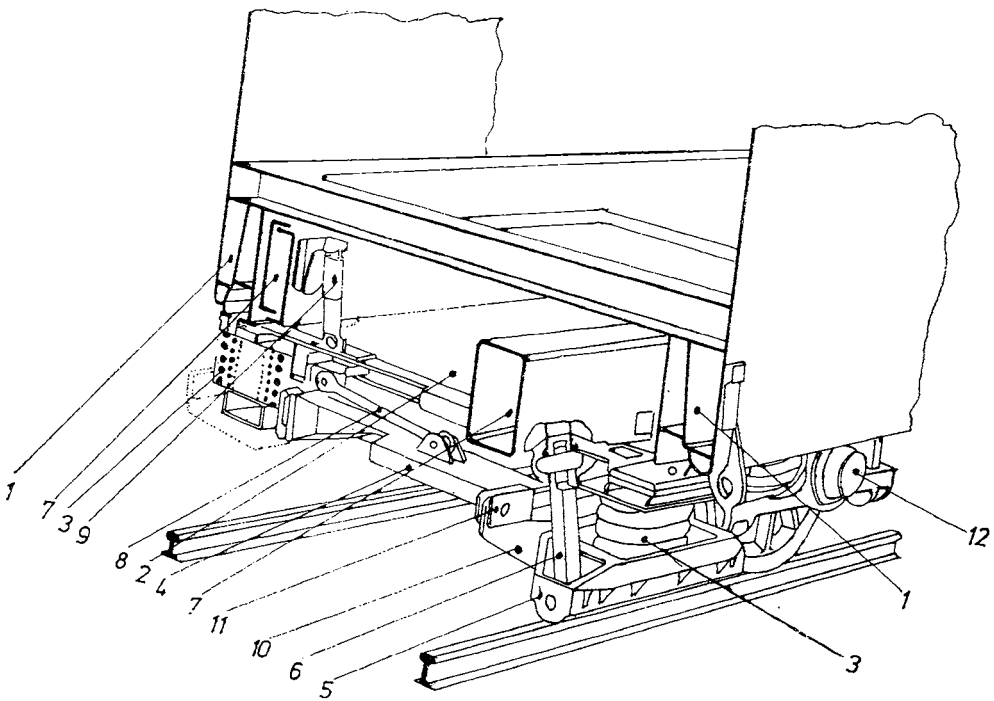



*Fig. 9.5.* Sistemul de sprijin și legare a cutiei: *1* — șasiul inferior al cutiei; *2* — suportul transversal al cutiei. *3* — arc de suspensie al cutiei; *4* — traversă dansantă; *5* — suport de arc; *6* — pendul ; *7* — cadrul boghiului ; *8* — levier transversal ; *9* — amortizor vertical ; *10* — suportul traversei dansante; *11* — levier longitudinal; *12* — cutie de osie.

Mișcările laterale și de rotire ale boghiului sînt asigurate, în lipsa pivotului, de către pendulele traversei dansante care, în acest scop, sînt prevăzute la ambele capete cu articulații de cauciuc ce permit mișcarea în toate direcțiile. La boghiul central lungimea și unghiul de înclinare al pendulelor sînt diferite de cele ale boghiurilor exterioare și astfel alese încît în aliniament să centreze cutia, iar în curbe să permită deplasarea laterală a boghiului central. În felul acesta forța centrifugă a cutiei se repartizează mai egal asupra celor trei boghiuri.

Pentru amortizarea mișcărilor cutiei servesc amortizoare hidraulice orizontale și verticale. Primele sînt montate între traversa frontală a boghiului și partea inferioară a cutiei, celelalte paralel cu arcurile suspensiei secundare.

La locomotivele 11601 și 11602 pentru suspensia cutiei se folosesc arcuri elicoidale triple, așezate unul în interiorul celuilalt. Pe fiecare parte a boghiului se află cîte un asemenea arc. La locomotive 11603 pe fiecare parte a unui

boghiu se află cîte două grupuri de arcuri elicoidale, arcurile boghiurilor exterioare avînd o constantă de elasticitate mult mai mare decît cele ale boghiului central. La locomotive 11604 se utilizează arcuri pneumatice cu presiunea de cca 5,2 at.

Transmiterea forțelor de tracțiune și frînare de la boghiu la cutie se face prin bare de tracțiune joasă solicitate exclusiv la întindere. Barele de tracțiune sînt legate între ele sub nivelul electromotorului de așa manieră încît forța de tracțiune acționează practic la nivelul șinei, astfel încît nu se produce descărcarea osiilor prin cuplul de cabraj al boghiului. Prin aceasta se asigură o bună utilizare a aderenței.

De la barele de tracțiune forța se transmite la cutie prin intermediul unui arc de cauciuc precomprimat, avînd caracteristică progresivă. Arcurile asigură o elasticitate în direcția longitudinală și provoacă solicitarea barelor numai la tracțiune.

### 9.1.4. Repartizarea sarcinilor pe osii și utilizarea aderenței

9.1.4.1. *Locomotiva cu cutie din două unități*

În regim staționar, boghiurile sînt încărcate în mod egal. În regim de tracțiune se produce un cuplu de cabraj al cutiei care provoacă încărcarea suplimentară a unora din boghiuri și descărcarea altora. Sarcina pe osie depinde de forțele de tracțiune $F_{01}$, $F_{02}$ și $F_{03}$ ale fiecărui boghiu și se calculează din condițiile de echilibru ale unităților locomotivei (fig. 9.6):

— pentru prima unitate (ecuațiile de proiecție și moment)

$$F_{01} - F_4 = 0 \tag{1}$$

$$\Delta F_1 - \Delta F_5 = 0 \tag{2}$$

$$\Delta F_{1a} + F_4 \cdot h_2 = 0 \tag{3}$$

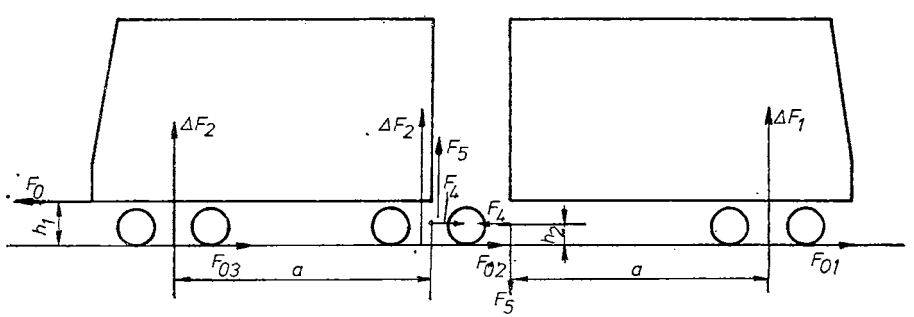



*Fig. 9.6.* Schema de calcul a cabrajului la LE tip Bo-Bo-Bo cu cutia din două unități.

— pentru a doua unitate:

$$F_{02} + F_{03} + F_4 - F_0 = 0 \tag{4}$$

$$\Delta F_2 + \Delta F_3 + F_5 = 0 \tag{5}$$

$$F_4 h_2 + \Delta F_3 a - F_0 h_1 = 0 \tag{6}$$

unde:

$\Delta F_1$, $\Delta F_2$, $\Delta F_3$ sînt încărcările suplimentare ale boghiurilor;
$F_0$ — forța de tracțiune la cîrlig; $F_0 = F_{01} + F_{02} + F_{03}$
$F_4$, $F_5$ — forțele din articulațiile cutiei.

Din rezolvarea ecuațiilor (1) ... (6) obținem încărcările suplimentare ale boghiurilor:

$$\Delta F_1 = -\frac{h_2}{a} F_{01} \tag{7}$$

$$\Delta F_2 = -\frac{h_1}{a}(F_{02} + F_{03}) - \frac{h_1 - 2h_2}{a} F_{01} \tag{8}$$

$$\Delta F_3 = \frac{h_1}{a}(F_{02} + F_{03}) + \frac{h_1 - h_2}{a} F_{01} \tag{9}$$

Ecuația (7) arată că încărcarea suplimentară a primului boghiu ($\Delta F_1$) se anulează cînd $h_2 = 0$, adică atunci cînd articulația unităților s-ar găsi la nivelul șinei. În acest caz $\Delta F_2$ și $\Delta F_3$ iau valori extreme:

$$\Delta F_2 = -\frac{h_1}{a}(F_{01} + F_{02} + F_{03}) \tag{8'}$$

$$\Delta F_3 = \frac{h_1}{a}(F_{01} + F_{02} + F_{03}) \tag{9'}$$

Pentru cazul real în care $F_{01} = F_{02} = F_{03}$ și $\Delta F_1 = \Delta F_2$, se va căuta o valoare pentru $h_2$. Din ecuațiile (7) și (8) rezultă $h_2 = h_1$ adică articulația dintre cele două unități se găsește la înălțimea tampoanelor (dealtminteri așa și este executată articulația). În acest caz se modifică ecuațiile (7), (8) și (9) după cum urmează:

$$\Delta F_1 = -\frac{h_1}{a} F_{01} \tag{7''}$$

$$\Delta F_2 = -\frac{h_1}{a}(F_{02} + F_{03} - F_{01}) \tag{8''}$$

$$\Delta F_3 = \frac{h_1}{a}(F_{02} + F_{03}). \tag{9''}$$

În exploatare curentă cînd $F_{01} = F_{02} = F_{03}$, în funcție de forța de tracțiune la cîrlig se obțin următoarele încărcări suplimentare ale boghiurilor:

$$\Delta F_1 = \Delta F_2 = -\frac{h_1}{a}\frac{F_0}{3} \tag{10}$$

$$\Delta F_3 = \frac{h_1}{a}\frac{2F_0}{3}. \tag{11}$$

Variația sarcinilor pe osie în funcție de forța de tracțiune la cîrlig este reprezentată în diagrama din figura 9.7.

Conform ecuațiilor (7''), (8'') și (9'') în cazul anulării forței de tracțiune a primului boghiu ($F_{01}$), se supraîncarcă suplimentar boghiul din mijloc, De asemenea aceeași situație o întîlnim și în cazul în care primul boghiu ajunge în situație de patinare datorită unei denivelări a căii.

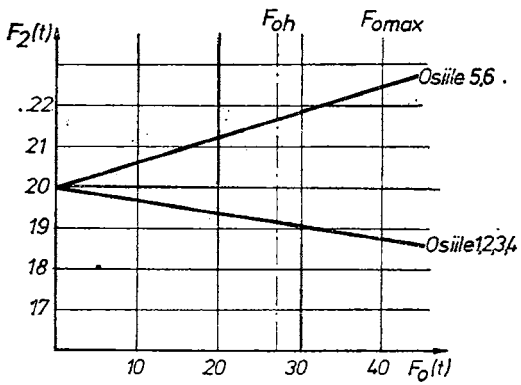



*Fig. 9.7.* Variația sarcinei pe osii ($F_2$), în funcție de forța de tracțiune (valabilă și pentru locomotivă cu cutia unică și suspensie secundară pneumatică).

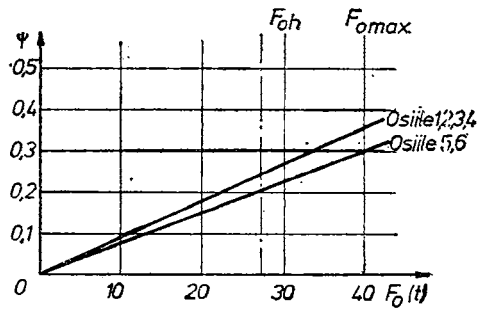



*Fig. 9.8.* Variația coeficientului de aderență (ψ), în funcție de forța de tracțiune.

Coeficientul de aderență ψ, pe fiecare osie în funcție de forța de tracțiune totală, $F_0$, are o variație ca în figura 9.8.

9.1.4.2. *Locomotiva cu cutie unică*

Din figura 9.9, reies condițiile de echilibru pentru boghiu:

$$\Delta F_i - \Delta P_i + S_i \sin \alpha = 0 \qquad (12)$$

$$F_i - S_i \cos \alpha = 0 \qquad (13)$$

unde: $F_i$ este forța de tracțiune pe boghiu;
$\Delta F_i$ — variația sarcinii pe boghiu;
$\Delta P_i$ — variația forței în suspensia secundară (rezemarea cutiei);
$S_i$ — forța din bara de tracțiune;
$\alpha$ — unghiul de înclinare al barei de tracțiune.

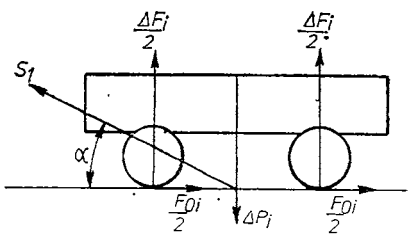



*Fig. 9.9.* Schema forțelor exterioare ce acționează asupra unui boghiu în cazul locomotivei cu cutie unică.

$$\Delta P_i = \Delta F_i + F_{0i} \operatorname{tg} \alpha. \qquad (14)$$

Din figura 9.10 se observă forțele ce acționează asupra cutiei:

$$\Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 - S_i \sin \alpha - S_2 \sin \alpha - S_3 \sin \alpha = 0 \qquad (15)$$

$$S_1 \cos \alpha + S_2 \cos \alpha + S_3 \cos \alpha - F_0 = 0 \qquad (16)$$

$$S_1 b \sin\alpha + S_2(b + a)\sin\alpha + S_3(b + 2a)\sin\alpha - \Delta P_2 a - \Delta P_3 2a = 0 \quad (17)$$

unde:

$a$ este distanța între centrele a două boghiuri;
$b$ — proiecția barei de tracțiune pe orizontală.

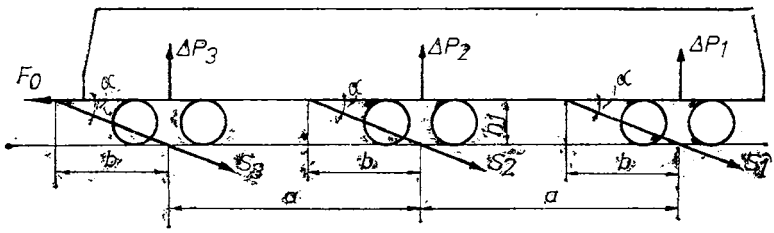



*Fig. 9.10.* Schema forțelor exterioare ce acționează asupra cutiei unice.

Din relațiile (12) ... (17) se obține:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{h_1}{b}$$

și relațiile:

$$\Delta F_1 + \Delta F_2 + \Delta F_3 = 0 \quad (18)$$

$$F_{01} + F_{02} + F_{03} - F_0 = 0 \quad (19)$$

$$\Delta F_2 + 2\Delta F_3 - (F_{01} + F_{02} + F_{03})\frac{h_1}{a} = 0. \quad (20)$$

Astfel, pentru cele 4 necunoscute $\Delta F_1$, $\Delta F_2$, $\Delta F_3$ și $F_0$ se obțin trei ecuații, deci sistemul este static nedeterminat.

Pentru *locomotiva cu susîensie pneumatică* (boghiul *1* se consideră legat cu boghiul *2* prin balancierul pneumatic) și deci $\Delta P_1 = \Delta P_2$ și folosind și relația (14) obținem:

$$\Delta F_1 + F_{01}\operatorname{tg}\alpha = \Delta F_2 + F_{02}\operatorname{tg}\alpha. \quad (21)$$

Din ecuațiile (18) și (21) rezultă:

$$\Delta F_3 = -2\Delta F_2 + (F_{01} - F_{02})\operatorname{tg}\alpha. \quad (22)$$

Introducînd (22) în (20) obținem:

$$(F_{01} + F_{02} + F_{03})\frac{h_1}{a} = F_2 - 4\Delta F_2 + 2(F_{01} - F_{02})\operatorname{tg}\alpha$$

de unde:

$$\Delta F_2 = -\frac{1}{3}\frac{h_1}{a}(F_{01} + F_{02} + F_{03}) + \frac{2}{3}(F_{01} - F_{02})\operatorname{tg}\alpha. \quad (23)$$

Introducînd ecuația (23) în (22) obținem:

$$\Delta F_3 = \frac{2}{3}\frac{h_1}{a}(F_{01} + F_{02} + F_{03}) - \frac{1}{3}(F_{01} - F_{02})\operatorname{tg}\alpha \quad (24)$$

Din relațiile (18), (22) și (23) rezultă:

$$\Delta F_1 = -\frac{h_1}{a}(F_{01}+F_{02}+F_{03}) - \frac{1}{3}(F_{01}-F_{02})\ \text{tg}\ \alpha. \tag{25}$$

În cazul în care $F_{01} = F_{02}=F_{03}$ se obțin următoarele valori ale descărcării boghiurilor:

$$\Delta F_1 = -\frac{1}{3}\frac{h_1}{a}F_0; \tag{25'}$$

$$\Delta F_2 = -\frac{1}{3}\frac{h_1}{a}F_0; \tag{23'}$$

$$\Delta F_3 = \frac{2}{3}\frac{h_1}{a}F_0. \tag{24'}$$

Aceste ecuații corespund relațiilor (10) și (11) pentru cutia din două unități.

Ca și în cazul locomotivei cu 2 unități putem construi diagrama de variație a sarcinii pe osie în funcție de forța de tracțiune totală ($F_0$), la fel ca la locomotiva cu două unități.

Variația coeficientului de aderență $\psi$, pe fiecare osie în funcție de forța totală de tracțiune ($F_0$) rămîn aceleași ca în cazul cutiei din două unități (fig. 9.7 și 9.8).

Din relațiile (14) și (15) rezultă:

$$\Delta P_1 = -\frac{1}{3}\frac{h_1}{a}(F_{01}+F_{02}+F_{03}) + \frac{1}{3}(F_{02}+2F_{01})\ \text{tg}\ \alpha,$$

iar pentru $F_{01} = F_{02}=F_{03}$

$$\Delta P_1 = -\frac{1}{3}\frac{h_1}{a}F_0 + \frac{1}{3}F_0\ \text{tg}\ \alpha.$$

$\Delta P_1$ și deci și $\Delta P_2$ devin egale cu zero atunci cînd (așa cum este cazul la locomotiva *Re* 6/6) $\text{tg}\ \alpha = \frac{h_1}{a}$ sau cînd $a = b$.

În această situație nu se produce în arcurile pneumatice *1* și *2* nici un consum de aer legat de forța de tracțiune.

*Locomotiva cu suspensie cu arcuri elicoidale* (rigiditatea arcurilor boghiurilor extreme este aceiași).

Din relațiile (14), (18), (19) și (20) și ținînd seama de relația:

$$\Delta P_i = c_i\,\Delta y_i, \tag{26}$$

unde: $c_i$ sînt constantele de elasticitate ale suspensiei primare și secundare ale fiecărui boghiu;

$\Delta y_i$ — săgețile arcurilor sistemului $i$.

Pentru locomotivă avem următoarea egalitate:

$$\Delta y_1 - \Delta y_2 = \Delta y_2 - \Delta y_3. \tag{27}$$

În cazul în care $c_1 = c_3$ obținem:

$$\Delta F_1 = \Delta P_1 - F_{01} \operatorname{tg} \alpha = c_1 \cdot 2\Delta y_2 - c_1 \cdot \Delta y_3 - F_{01} \operatorname{tg} \alpha;$$

$$\Delta F_2 = c_2 \cdot \Delta y_2 - F_{02} \operatorname{tg} \alpha;$$

$$\Delta F_3 = c_1 \cdot \Delta y_3 - F_{03} \operatorname{tg} \alpha,$$

de unde:

$$\Delta y_2 = (F_{01} + F_{02} + F_{03}) \frac{h_1}{a} \frac{1}{2c_1 + c_2} \quad \left(\text{pentru } \operatorname{tg} \alpha = \frac{h_1}{a}\right).$$

$$\left.\begin{aligned} \Delta F_2 &= -\frac{1}{2}\frac{h_1}{a} F_0 \left(\frac{2}{3} - \frac{2c_2}{2c_1 + c_2}\right) \\ \Delta F_3 &= \frac{1}{2}\frac{h_1}{a} F_0 \left(\frac{4}{3} - \frac{c_2}{2c_1 + c_2}\right) \end{aligned}\right\} \tag{28}$$

pentru:

$$F_{01} = F_{02} = F_{03} = \frac{1}{3} F_0. \tag{29}$$

$$\Delta F_1 = -\frac{1}{2}\frac{h_1}{2} F_0 \left(\frac{c_2}{2c_1 + c_2} + \frac{2}{3}\right) \tag{30}$$

Pentru locomotiva *Re* 6/6 seria 11603 (cu cutie unică și suspensia secundară cu arcuri) diagrama de variație a sarcinii pe osie în funcție de forța totală de tracțiune este reprezentată în figura 9.11, iar diagrama variației

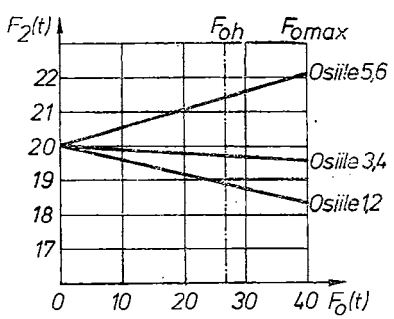



*Fig. 9.11.* Variația sarcinii pe osii în funcție de forța de tracțiune (locomotiva 11603).

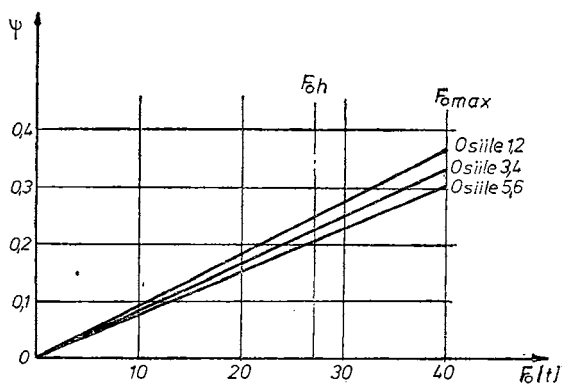



*Fig. 9.12.* Variația coeficientului de aderență, în funcție de forța de tracțiune.

coeficientului de aderență pentru fiecare osie în funcție de forța totală de tracțiune este redată în figura 9.12.

Aceste diagrame împreună cu celelalte 2 sînt valabile și pentru locomotivele *Re* 6/6 tip 11601, 11602 și 11604.

9.1.5. **Concluzii.** Încercările în parcurs ale locomotivelor *Re* 6/6 (11601, 11602, 11603 și 11604) au satisfăcut și verificat condițiile impuse prin caietul de sarcini al locomotivelor respective.

Pe baza rezultatelor obținute la parcursurile de probă s-au tras unele concluzii în ceea ce privește construcția cutiei. În principiu, cutia dintr-o bucată, către care se orientează tehnica actuală prezintă următoarele avantaje:

— cablaj mai simplu pentru conductoarele electrice și conductele de aer comprimat, canale de ventilație mai simple datorită lipsei legăturilor mobile dintre cele două părți;

— ridicarea ușoară a cutiei în atelierele de reparații;

— dificultăți mai mici la repunerea locomotivei pe linie, după deraieri.

Soluția prezintă unele inconveniente legate de înălțimea mai mică a culoarului de trecere prin sala mașinilor.

Se constată în prezent, pe plan mondial, o extindere a sferei de utilizare a locomotivelor cu trei boghiuri pe 2 osii, care sînt menite să înlocuiască locomotivele cu două boghiuri pe 3 osii.

Unele țări cu linii grele de munte, au în exploatare, cu bune rezultate, locomotive electrice și diesel cu formula osiilor *Bo—Bo—Bo* sau *B — B — B*, datorită utilizării boghiurilor pe două osii, care au o acțiune mai puțin nocivă în privința uzurilor căii și bandajelor decît boghiurile pe trei osii.

Formula *Bo—Bo—Bo* permite realizarea unui boghiu unificat cu care se poate realiza locomotiva electrică *Bo—Bo* (4 osii) și *Bo—Bo—Bo* (6 osii), adică practic un singur tip de locomotivă electrică ceea ce reprezintă o mare simplificare în privința întreținerii și exploatării parcului de locomotive electrice.

Administrațiile de cale ferată care acum introduc locomotive electrice pe 6 osii se orientează, datorită considerațiilor de mai sus, către formula *Bo—Bo—Bo*.

Ca exemplu, în afară de Elveția, Franța și Japonia, de care s-a amintit, menționăm că din 1972 și căile ferate Coreene au 66 locomotive electrice *Bo—Bo—Bo* (boghiul median este dotat cu rulmenți transversali speciali ce permit o ușoară deplasare transversală a lui la trecerea prin curbe; linia respectivă are numeroase curbe cu *R* 250 m și *R* 76 m în triaje).

## 9.2. LOCOMOTIVE ELECTRICE DE CURENT MONOFAZAT DE 50 Hz, 25 kV, CU TIRISTOARE DE O CONCEPȚIE TEHNICĂ NOUĂ

În cele de mai jos se prezintă locomotiva electrică BB 15000 existentă în exploatare la C. F. Franceze (SNCF) și care este concepută pentru serviciul de călători în ideea realizării unui vehicul motor de 88 t cu boghiuri monomotor, care să prezinte o putere maximă, o viteză maximă ridicată și să utilizeze toate avantajele pe care le poate oferi electronica industrială. Echipamentul său permite demarajul, frînarea recuperativă, frînare reostatică și este comandat printr-un sistem de reglare automată la „viteză impusă" care menține mașina în fiecare moment la performanțele sale maxime.

9.2.1. **Date principale privind partea mecanică.** În figura 9.13 sînt date dimensiunile gabaritice.

Alte elemente ale părții mecanice:

— masa cutiei . . . . . 20 t
— boghiuri (fără motoare) . . . . . 30 t.
— auxiliare diverse (cablaj, aparataj cabine, aparataj de acoperiș) 9,5 t.

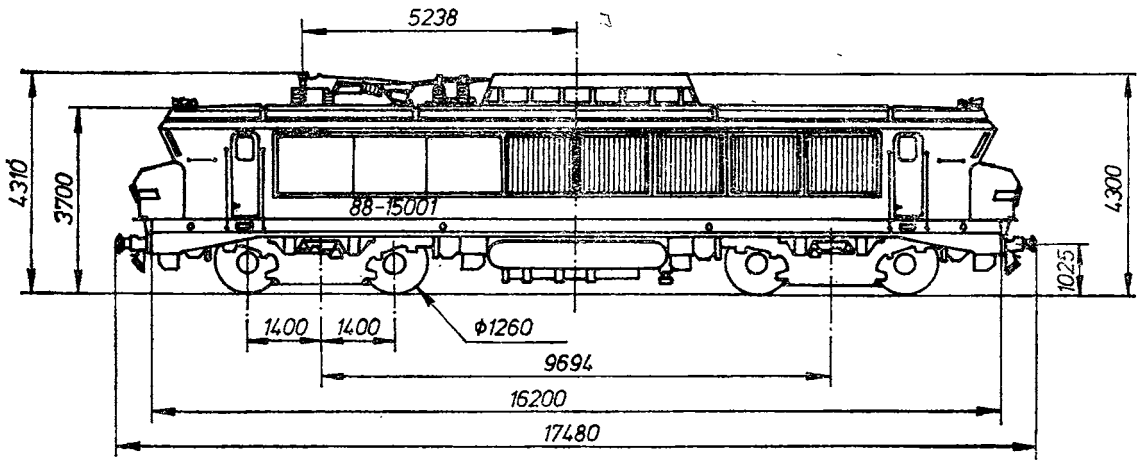



*Fig. 9.13.* Dimensiuni gabaritice.

— partea electrică: motoare de tracțiune . . . . . 14 t.
transformator . . . . . 11,5 t.
bloc redresor . . . . . 1,9 t.
— greutatea locomotivei, în stare de serviciu . . . . . 88 t.
— sarcina pe osie . . . . . 22 t.
— sarcina liniară (între osiile extreme) . . . . . 7,03 t/m
— lățimea maximă a cutiei . . . . . 3,076 m,
— tipul boghiurilor . . . . . monomotor
— înălțimea centrului de greutate al boghiului . . . . . 0,82 m.
— idem, pentru cutie . . . . . 1,763 m.
— raportul de transmitere . . . . . 1,659
— diametrul roții motoare (nou) . . . . . 1260 mm.
— viteza maximă constructivă . . . . . 180 km/h.
— raza minimă de înscriere în curbă . . . . . 100 m.

Motorul de tracțiune (de tip complet suspendat) este fixat pe o traversă centrală a boghiului prin patru buloane. Un sistem de șuruburi — cric permite poziționarea motorului în plan orizontal față de reductor. Acționarea osiei se face printr-un sistem de transmisie elastică (cardan prin interiorul unui arbore gol) care preia și jocurile dintre osie (partea nesuspendată) și motorul de tracțiune.

Soluția constructivă a osiei montate este redată în figura 9.14.

Schema cinematică a reductorului (cu un singur raport de transmitere) este prezentată în figura 9.15.

9.2.2. **Date principale ale părții electrice.** Parametrii caracteristici sînt următorii:

— puterea continuă, kW · · · ·cîmp plin 4420; cîmp redus 4650
— viteza corespunzătoare, km/h · · · · ·104,5 ; 170,5
— tensiunea nominală pe motor, V · · · · · · · · ·1500
— curent nominal pe motor, A · · · · · · · ·1550 ; 1650.

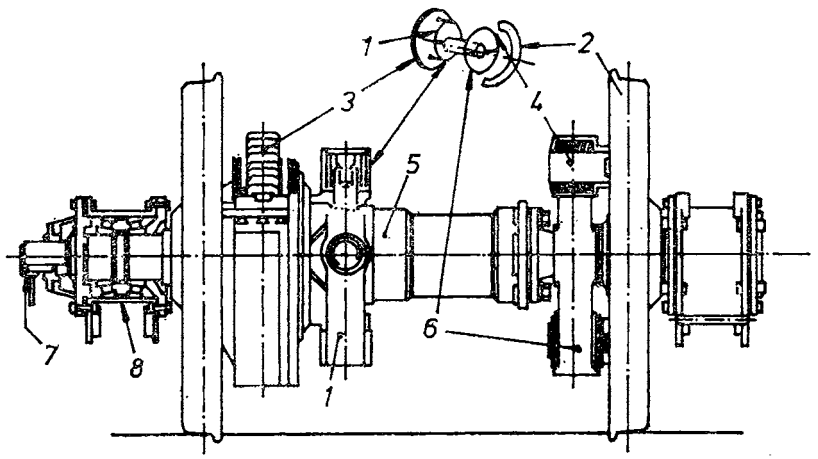



*Fig. 9.14.* Osia montată: *1* — inel conducător; *2* — roata de rulare; *3* — roata dințată principală; *4* — legătură elastică transmisie-roată; *5* — transmisie cardan; *6* — inel condus; *7* — piesă de frecare pentru returul curentului; *8* — cutie de unsoare cu rulmenți (rulouri conice).

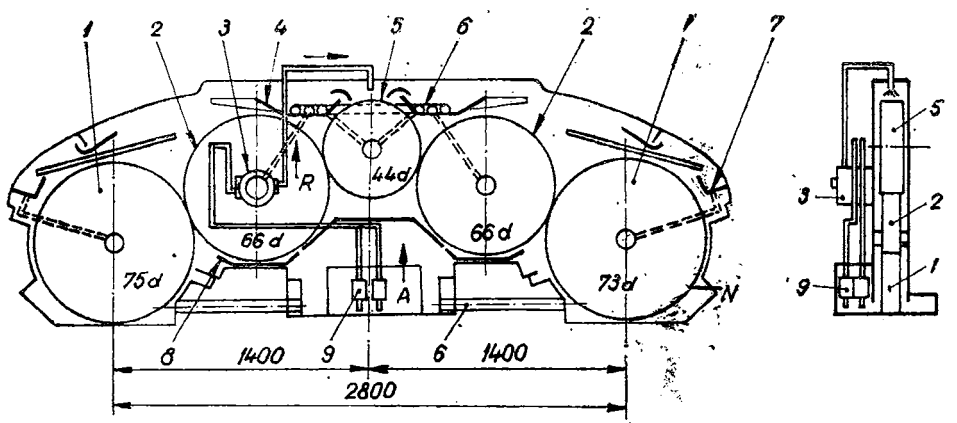



*Fig. 9.15.* Schema cinematică a reductorului: *1* — roata dințată principală (73 dinți); *2* — roată dințată intermediară (66 dinți); *3* — pompă pentru circulația uleiului; *4* — jgheab pentru alimentarea cu ulei a palierelor pinionului și roților dințate intermediare; *5* — pinionul motorului (44 dinți); *6* — conducte de echilibru; *7* — jgheab pentru alimentarea palierului roții dințate principale; *8* — cuvă de barbotaj; *9* — filtru; *R* — refulare; *A* — aspirație *N* — nivelul uleiului.

Schema circuitului principal de forță, în regim de tracțiune este redată în figura 9.16, iar în figura 9.17 s-a reprezentat tensiunea redreasă în funcție de comanda punților redresoare.

Fiecare motor de tracțiune este alimentat de două punți redresoare legate în serie; o punte simetrică complet tiristorizată-*pc* (tiristori în toate brațele punții) și o punte asimetrică mixtă — *pm* — (în două brațe tiristori și în celelalte două brațe diode).

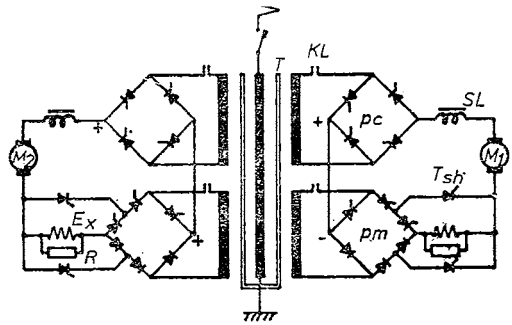



*Fig. 9.16.* Schema electrică de principiu a circuitului principal de forță : $T$ — transformatorul principal (cu raport fix de transformare) ; *pc* — punte complet tiristorizată ; *pm* — punte mixtă (tiristori și diode) ; $M_1$ — indusul motorului de tracțiune ; $E_x$ — înfășurarea de excitație serie a motorului de tracțiune ; $T_{sh}$ — tiristori pentru șuntarea continuă a excitației ; $R$ — rezistența ohmică (șuntare permanentă) ; $SL$ — self de aplatisare ; $KL$ — contactor pentru deconectarea punții de redresare cînd locomotiva nu funcționează (oprire, mers fără curent ...) în scopul protejării punții împotriva supratensiunilor din linie.

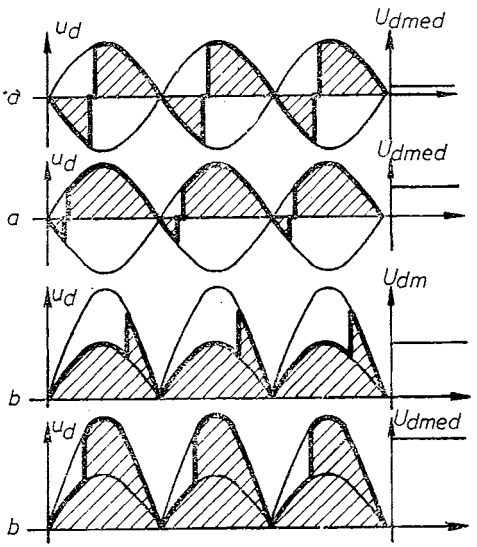



*Fig. 9.17.* Tensiunea redresată în funcție de comanda unghiului de aprindere a tiristorilor : *a* — comanda punții *pc* ; *b* — comanda punții *pm* ; $u_d$ — tensiunea redresată ; $U_{dmed}$ — tensiunea medie redresată.

Pentru a aplica o tensiune progresivă la motoare, se începe prin micșorarea unghiului de aprindere ($\alpha$) a punții tiristorizate. În figura 9.17, *a* s-a reprezentat tensiunea redresată pentru două valori ale unghiului $\alpha$; semitensiunea redresată se atinge pentru $\alpha\ (pc) = 0$. Creșterea tensiunii (deci cealaltă semitensiune) se obține prin acționarea asupra lui $\alpha\ (pm)$ cum rezultă din figura 9.17, *b* tensiunea nominală se obține la $\alpha\ (p, m) = 0$.

Creșterea vitezei locomotivei se obține în continuare prin șuntarea continuă a fluxului inductor al motorului, derivînd curentul din înfășurarea de excitație în tiristorii $T_{sh}$ prin acționarea asupra lui $\alpha(T_{sh})$ pînă la limita cîmpului redus maxim 60%.

Se subliniază că blocarea tiristoarelor de șuntaj se efectuează odată cu tiristorii și diodele din brațele punții (*pm*) cu care sînt înseriați.

Locomotiva este înzestrată cu *frînare electrică recuperativă*, a cărei schemă electrică este redată în figura 9.18.

În regim de frînă electrică recuperativă, motoarele serie devin generatoare de curent continuu cu excitație separată (schimbarea sistemului de excitație se face prin jocul de contactoare „tracțiune-frînare") care debitează

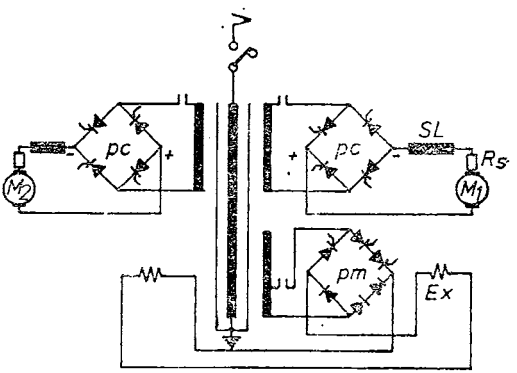



*Fig. 9.18.* Schema electrică de principiu a frînei electrice recuperative. *RS*—rezistența de stabilizare.

pe punțile complet tiristorizate (*pc*) lucrînd în regim de ondulor. Pentru alimentarea excitațiilor se folosește una din punțile mixte (*pm*).

Caracteristica de frînare $F_f(V)$ este redată în figura 9.19, cu mențiunea că reglarea frînării se face în mod continuu prin variația unghiului de aprindere a tiristorilor (180°—120°) care conduce la variația curentului de excitație ($i = 410 \ldots 810$ A) și prin reglarea tensiunii ondulorului, curentul de excitație fiind menținut la o valoare constantă ($i = 810$ A).

Reglarea tensiunii punții onduloare se obține prin decalajul unghiului de aprindere (de la 33° — unghiul de gardă, la 180°). Curbele din figura

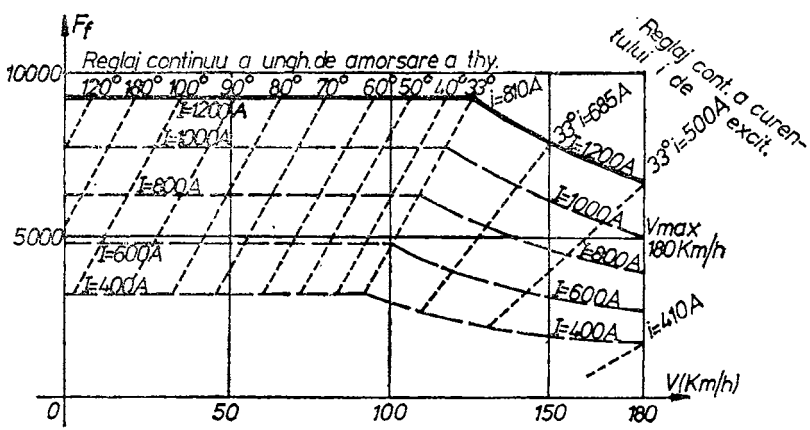



***Fig. 9.19.* Caracteristica de frînare recuperativă.**

9.20 arată evoluția tensiunii medii ondulate ($U$) în cursul acestui reglaj, care trece succesiv de la valoare negativă, la o valoare nulă și apoi la valori pozitive.

Rezistența de stabilizare ($RS$), montată în serie în circuitul punte ($pc$) — motor, asigură ondulorului stabilitatea și protecțiile necesare bunei funcționări la variațiile tensiunii din linia de contact și mai ales în procesul de desprindere a pantografului care ar putea conduce la recomutații.

Locomotiva este de asemenea înzestrată și cu *frînă electrică reostatică de siguranță*, care intră în acțiune automat la pierderea frînării recuperative

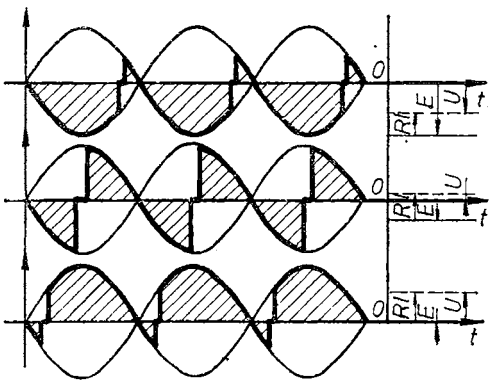



*Fig. 9.20.* Variația tensiunii ondulate, în procesul de reglare.

(la căderea tensiunii din linia de contact). Schema electrică de principiu este prezentată în figura 9.21.

Cele două motoare de tracțiune $M_1$, $M_2$ (devenite generatoare) debitează pe cîte o rezistență de frînare $R_F$. Alimentarea înfășurărilor de excitație separată este asigurată de la bateria de acumulatori $BA$; în consecință frîna reostatică este independentă de tensiunea din linia de contact.

Pentru obținerea forței de frînare necesară, se adaugă și o frînare pneumatică peste cea obținută cu frîna electrică reostatică.

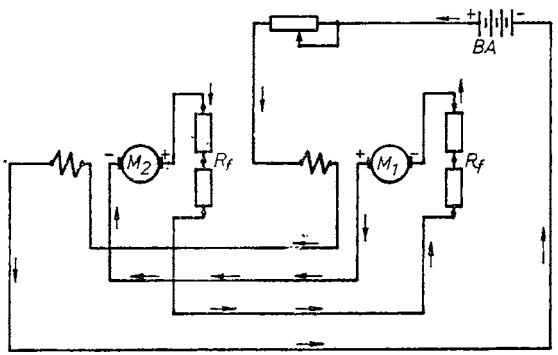



*Fig. 9.21.* Schema electrică de principiu a frînei reostatice.

Caracteristica de frînare reostatică $F_f(V)$ este redată în diagrama din figura 9.22.

*Redresorul.* Schema de ansamblu a redresorului pentru alimentarea unui motor de tracțiune este redată în figura 9.23.

Puntea tiristorizată, are alcătuit un braț din patru ramuri în paralel a doi tiristori în serie pe ramură (32 tiristori în total pe punte); puntea mixtă are cele două brațe cu tiristori alcătuite fiecare din trei ramuri în paralel a doi tiristori în serie pe ramură (6 tiristori pe braț, respectiv $2 \times 6$

tiristori pe punte), iar un braț cu diode are cinci ramuri în paralel a două diode în serie (10 diode pe braț, respectiv 2 × 10 diode pe punte).

Cu toate că tiristorii și diodele folosite prezintă aceleași caracteristici (1600 V și 550 A), neomogenitatea numărului de elemente în paralel în punți este dictat de funcționarea punților înseriate; în perioada de demaraj curentul se repartizează egal în brațele cu tiristori ale punții complete (cu aceasta se începe demarajul), însă trece în totalitate și prin ramurile cu diode ale

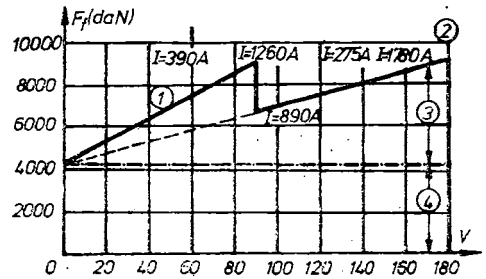



*Fig. 9.22.* Caracteristica de frînare reostatică: *I* — curentul de frînare (debitat de indus); *i* — curent de excitație; *4* — frînare pneumatică.

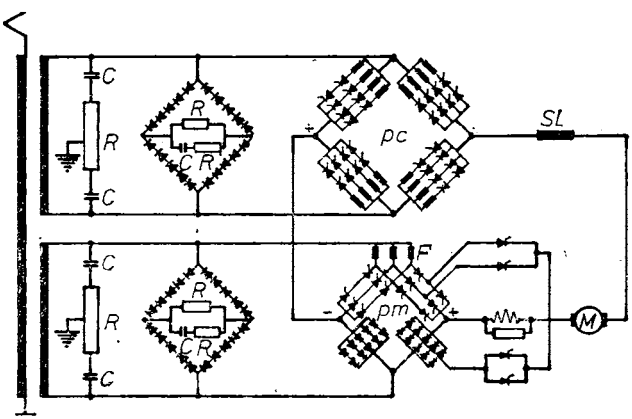



*Fig. 9.23.* Schema redresorului pentru alimentarea unui motor: *R, C* — rezistențe și capacități pentru protecție la supratensiuni; *F* — fuzibile pentru protecția la supraintensități (protecția la scurtcircuite este asigurată prin întrerupătorul principal).

punții mixte pînă cînd tiristorii acestei punți se deblochează (în prima punte curentul total este dat de două brațe, în cea de a doua curentul trece prin brațele cu diode).

*Motorul de tracțiune.* Locomotiva BB 15000 este echipată cu două motoare tip $TAB_{666}$ autoventilate, de curent ondulat, avînd circuitul magnetic din tole, comportă 8 poli principali, 8 poli auxiliari, înfășurare de compensație, iar izolația este realizată în clasa *H* (silicon) pentru indus și clasa *F* (epoxy) pentru inductor.

Motorul $TAB_{666}$ prezintă următorii parametri:

| | | |
|---|---|---|
| Regim continuu: | puterea, kW | 2210 |
| | tensiunea, V | 1500 |
| | curentul, A | 1550 |
| | turația, rot/min | 755 |
| | cîmp plin (considerat 87%) | |
| Curentul de demaraj, A | | 2600 |
| Turația maximă, rot/min | | 1400 |
| Răcirea prin autoventilare, la 755 rot/min | | 80 m³/min. |

Caracteristica de tracțiune $F_0(V)$ și $F_0(I)$ la $U_{LC} = 25$ kV, a locomotivei BB 15000, sînt redate în figura 9.24.

Parametrii mai importanți, corespunzători diagramei din figura 9.24 sînt următorii:

| Parametri | Regim continuu | |
|---|---|---|
| | cîmp plin (87%) | cîmp redus minim |
| Tensiunea pe motor, V | 1 500 | 1 500 |
| Curentul în motor, A | 1 550 | 1 650 |
| Puterea la arbore kW | 4 420 | 4 650 |
| Forța de tracțiune la obadă, daN | 14 700 | 9 600 |
| tf. | 15 | 9,8 |
| Viteza, km/h | 104,5 | 170,5 |
| Diametrul roții cu bandaj semiuzat, mm | 1 215 | |
| Raport de transmitere | $\frac{73}{66} \times \frac{66}{44} = 1{,}659$ | |
| Turația (rot./min.) | 7,24 V(km/h) | |

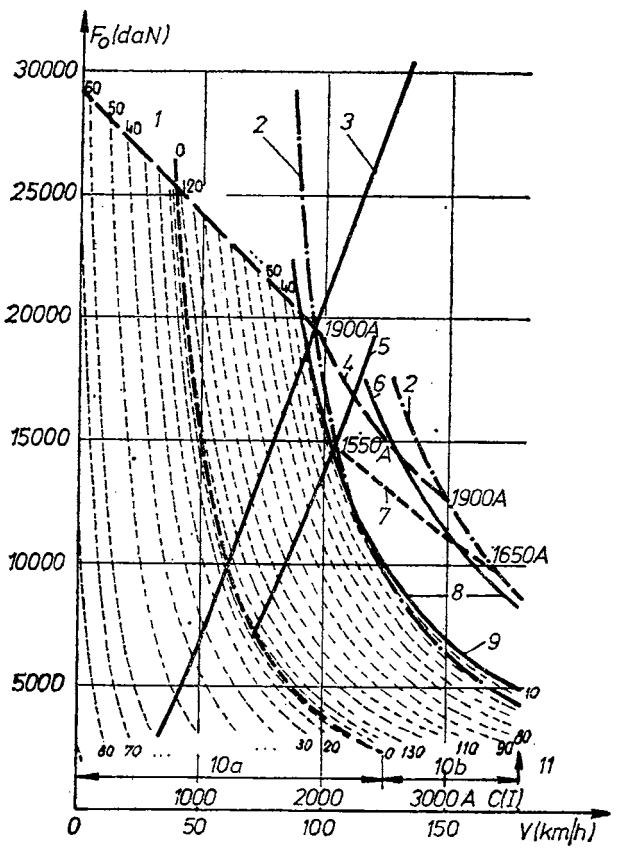



*Fig. 9.24.* Caracteristica de tracțiune $F_0(V)$, respectiv $F_0(I)$: *1* — valorile unghiului de deblocaj a tiristoarelor; *3* — $F_0(I)$ pentru cîmp maxim 87 %; *4* — limitare după tiristori; *5* — $F_0(I)$ pentru cîmp minim; *6* — $F_0(V)$ pentru cîmp minim; *7* — limitarea după *I* cont.; *8* — zona reglării continui a cîmpului redus; *9* — $F_0(V)$ la cîmp maxim (87 %); *10* — zona de reglaj continuu asupra punților de redresare a tensiunii pe motoare (10 a — pînă la 1/2 tensiune; 10 b — de la 1/2 tensiune la tensiunea nominală).

Pe diagrama $F_f(V)$ s-au trasat și limitările după curentul de excitație ($i$) și după curentul din indus ($I$).

9.2.3. **Conducerea și reglarea.** Acoperirea planului caracteristicei $F_0(V)$ în regim de tracțiune (conducerea și reglarea) se obține prin deblocarea succesivă a punții tiristorizate, a punții mixte și apoi dispozitivul de șuntaj. Acest lucru se obține acționînd asupra unui semnal de comandă (tensiune $U_c = 0 \ldots 25$ V) transmisă în defazorii sistemelor de mai sus, de exemplu prin intermediul unui potențiometru (este comanda directă „de siguranță"). Pentru a remedia inconvenientele comenzii directe se adoptă „comanda cu regulator de intensitate". Prin manipulator (controler), mecanicul „afișează" intensitatea curentului dorită la intrarea unui regulator. Această valoare este comparată cu intensitatea reală și regulatorul elaborează tensiunea de comandă care aplicată defazorilor permite obținerea intensității afișate. Acest mod de comandă trebuie să fie obligator completat printr-un dispozitiv de antipatinaj întrucît mersul la intensitate afișată nu permite să rezoarbă patinajele cum se întîmplă în cazul unei comenzi la „tensiune afișată".

Utilizarea unui regulator de intensitate permite dotarea cu o „Comandă automată la viteza impusă".

În acest dispozitiv , afișarea „vitezei" de către mecanic este comparată cu viteza real măsurată și dispozitivul elaborează o mărime care reprezintă forța ce trebuie dezvoltată pentru a atinge și menține viteza care a fost fixată. Cum efortul (forța de tracțiune) depinde de intensitate, în final se utilizează această mărime ca afiș la intrarea în regulatorul de intensitate.

Asupra locomotivei se pot efectua trei moduri de conducere și reglare:

— conducere la „viteză impusă" ($VI$);

— conducere manuală cu regulatorul de intensitate;

— conducere directă de siguranță.

Ansamblul dispozitivului de reglare cuprinde în esență un regulator de curent, un regulator de viteză, un dispozitiv de antipatinaj și un sistem logic de decizie „tracțiune-frînare".

În figura 9.25 este redată schema-bloc a circuitelor de comandă și reglare.

*a*. Conducerea la viteză impusă:

— Mecanicul afișează, prin manipulator, viteza pe care dorește să o obțină și pe care o citește la vitezometru; de asemenea se afișază limita curentului ce se dorește a se respecta;

— Dacă viteza tinde să depășească valoarea afișată, circuitele locomotivei sînt îndată dispuse pentru mersul în frînă recuperativă după ordinele date de dispozitivul „$VI$". În acest caz de asemenea, valoarea intensității de frînare se limitează prin afișarea „intensitate" fixată prin manipulator (fig. 9.25, *a*);

— În cazul cînd manipulatorul este pe poziția zero, afișarea intensității este nulă și locomotiva nu poate dezvolta nici o forță de tracțiune sau frînare;

— Atît în tracțiune cît și în frînare intensitatea afișată la intrarea în regulatorul de intensitate a motorului care patinează, este corectată de către dispozitivul de antipatinaj cu o mărime proporțională cu ecartul de viteză dintre două motoare (cel care patinează și celălalt în mers normal).

*b.* Conducerea manuală cu regulatorul de intensitate.

Maneta de tracțiune/frînă se pune manual pe poziția *T* (tracțiune) sau *F* (frînare), adică pe regimul în care se dorește funcționarea locomotivei. Pe aceste poziții, dispozitivul „*VI*" se află izolat (scos din funcție) și mecanicul reglează din manipulator forța de tracțiune (intensitatea ce dorește să o obțină) — figura 9.25, *b*.

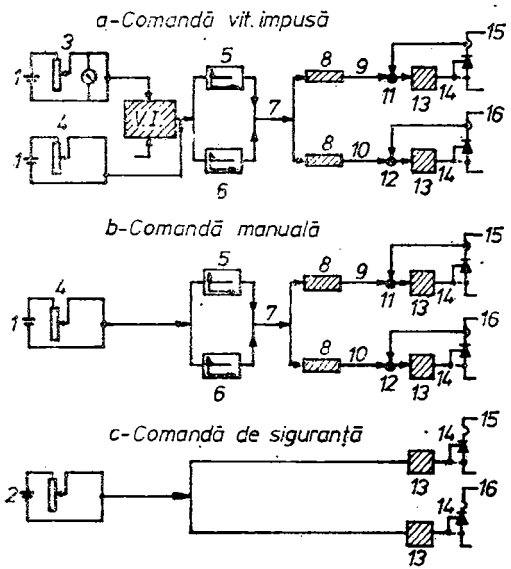



*Fig. 9.25.* Schema-bloc de comandă și reglare: *1*, *2* — sursa de alimentare stabilizată (baterie); *3* — afișarea de *VI* (maneta pe poz. *c*); *4* — afișarea intensității (volantul manipulatorului); *5* — frînare; *6* — tracțiune; *7* — *I* general de referință; *8* — corecție antipatinaj; *9* — *I* motor 1 de referință; *10* — *I* motor 2 de referință; *11* — măsura *I* motor 1; *12* — măsura *I* motor 2; *13* — defazor/aprindere; *14* — blocaj; *15* — motor 1; *16* — motor 2.

*c.* Comanda directă de siguranță.

În caz de avarie a regulatorului de intensitate, locomotiva poate funcționa la parametrii nominali prin comanda directă de siguranță. În acest scop se dispune comutatorul din blocul central pe poziția „mers de siguranță",

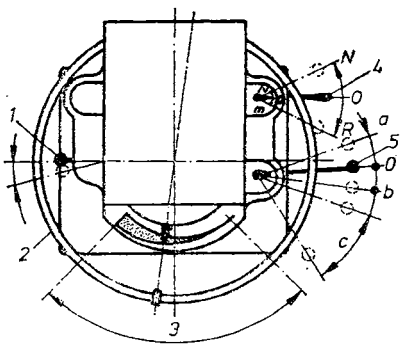


*Fig. 9.26.* Vedere schematică a controlerului LE — BB 15 000: *1* — maneta de înzăvorîre; *2* — volantul de conducere; *3* — plaja de afișare a intensității motorului; *4* — maneta de inversare; *5* — maneta tracțiune/frînare cu a) poziția frînare (comandă manuală) b — poziția tracțiune (comandă manuală), poziția c comandă la „VI".

iar defazorii sînt comandați prin potențiometru antrenat prin manevrarea volanului de conducere — figura 9.25, *c*.

O vedere schematică a controlerului (manipulatorului) de care dispune mecanismul pentru conducerea locomotivei este prezentată în figura 9.26.

9.2.4. **Serviciile auxiliare.** Schema electrică de principiu este redată în figura 9.27.

Serviciile auxiliare sînt următoarele:

— Un grup motopompă pentru circulația uleiului în ansamblul trafo-selfuri. Pentru antrenare se folosește motor asincron cu fază capacitivă permanentă;

— Două grupuri ventilatoare pentru răcirea în serie a ansamblelor trafo--selfuri-redresori-rezistențe de stabilizare. Motorul de antrenare este alimen-

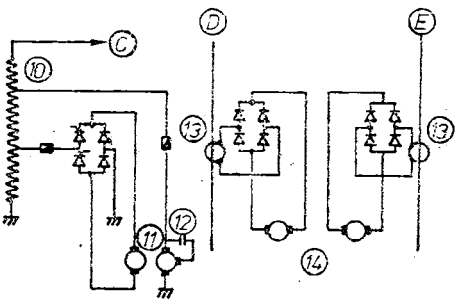



*Fig. 9.27.* Schema electrică a circuitului serviciilor auxiliare: *10*— înfășurarea secundarului trafo pentru încălzirea trenului; *1* — grup compresor; *12* — grup motor pompă ulei; *13* — trafo intensitate pentru alimentarea motoventilatoarelor blocurilor de redresare și răcitoare; *14* — grupuri motoventilatoare ale blocurilor de redresare și răcitoare; *C* — circuit încălzire tren; *D* — curentul motorului 1; *E* — curentul motorului 2.

tat print-un trafo de intensitate al cărui primar este parcurs de curentul motorului; în acest mod se reglează debitul ventilatorului în funcție de intensitatea absorbită;

— Un grup compresor antrenat de un motor serie curent continuu și joasă tensiune. Pentru alimentarea motorului se folosește o punte mixtă;

— Două punți tiristorizate, una pentru încărcarea bateriei (72 V), alta pentru reglarea sarcinei bateriei pentru alimentarea excitațiilor în regim de frînă reostatică de urgență.

## 9.3. REGLAREA PRIN IMPULSURI DE TENSIUNE (CHOPPER) A MOTOARELOR DE CURENT CONTINUU

9.3.1. **Generalități.** Variatorul de tensiune în curent continuu (chopperul) își bazează realizarea pe utilizarea tiristorului, cu mențiunea că dacă funcționarea sa nu pune probleme deosebite în curent monofazat întrucît stingerea se produce în mod natural prin anularea curentului ce îl parcurge la trecerea conducției pe celălalt tiristor din montaj, în curent continuu utilizarea tiristorului este mai delicată întrucît stingerea sa nu se poate produce pe cale naturală. Stingerea trebuie provocată pe cale artificială folosind o instalație specială realizată cu componente avînd caracteristici particulare. Dealtminteri acesta este și motivul pentru care utilizarea tiristorului în curent continuu nu s-a dezvoltat cu atîta rapiditate ca în curent monofazat.

9.3.2. **Noțiuni principale asupra alcătuirii și funcționării chopperului.** Schema elementară de principiu pentru reglarea tensiunii în curent continuu este redată în figura 9.28. Prin întrerupătorul static *I* se pune periodic

sub tensiune sarcina (motorul $M$), iar tensiunea medie aplicată la motor variază cu timpul cît întrerupătorul stă închis.

Pentru a obține o funcționare satisfăcătoare a motorului, schema trebuie completată cu un self de aplatisare ($SL$) și o „diodă de cale liberă" (D), ca în figura 9.29; pe diagramă s-au figurat formele de variație ale curentului în diversele puncte ale schemei. Tensiunea crenelată aplicată (fig. 9.30) se poate descompune într-o tensiune continuă $U_0$ și o componentă alternativă $U_\sim$. Coeficientul de self al motorului fiind mult mai mic decît al selfului de aplatisare, componenta continuă a tensiunii apare practic la

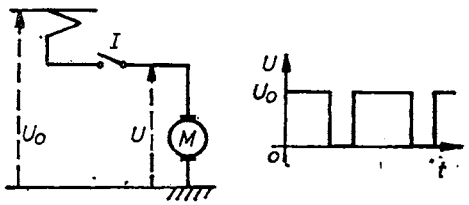



*Fig. 9.28.* Schema de principiu pentru reglarea tensiunii în curent continuu.

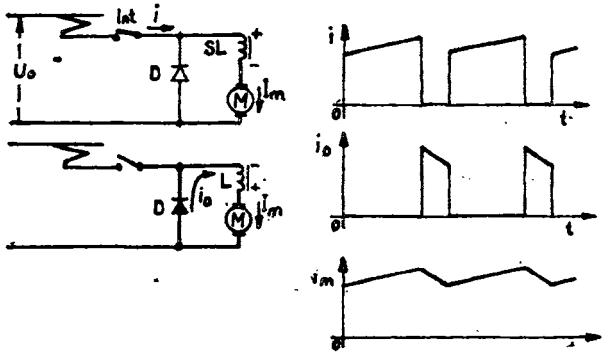



*Fig. 9.29.* Schema ameliorată pentru reglarea tensiunii și diagramele de variație a curentului.

bornele motorului, iar componenta alternativă la bornele selfului de aplatisare și care provoacă o tensiune electromotoare corespunzătoare. Atîta timp cît se aplică tensiune circuitului, curentul furnizat de sursă apare crenelat și cu partea superioară (dintele) cu pantă corespunzînd limitării date de self. În acest interval de timp selful înmagazinează energie (t.e.m. cu

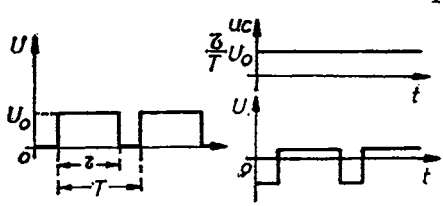



*Fig. 9.30.* Diagrama descompunerii tensiunii periodice.

polaritatea +, — ca în fig. 9.29). În timpul cît selful este deschis, selful cedează energia (t.e.m. dată de self este cu polaritatea —, +) și curentul se bucleză (se închide prin motor) prin dioda $D$.

În mod practic motorul se consideră parcurs de un curent ondulat și cu o tensiune continuă la borne.

Valoarea medie a tensiunii periodice este definită prin:

$$u_c = U\frac{\tau}{T}, \text{ unde:}$$

$T$ este perioada de funcționare a întrerupătorului;
$\tau$ — timpul de conducție a întrerupătorului;
$\tau/T$ — este denumit raport ciclic.

Chopperul se comportă ca un transformator de tensiune cu raport de transformare $\tau/T$; reglarea tensiunii se obține prin funcționarea la frecvență

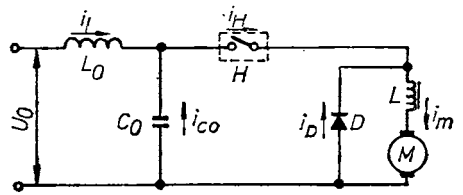



*Fig. 9.31.* Schema unui chopper cu filtru de rețea.

fixă ($T$) și timp de conducție ($\tau$) variabil. Mai este posibilă reglarea tensiunii și prin menținerea lui $\tau$ constant și frecvență variabilă ($T$) însă această soluție nu se practică din cauza riscurilor de a ajunge la frecvențe ce ar interfera cu frecvențe utilizate la circuitele de cale.

În timpul funcționării, datorită fenomenului de „tocare" a circuitului și curentul absorbit de la sursă (curentul de rețea) se deformează apărînd și el crenelat (pulsații dreptunghiulare) și este necesar a se lua măsuri pentru diminuarea deformațiilor. În acest sens, schema se mai completează cu un filtru ($L_0C_0$) intercalat între linie și Chopper (fig. 9.31); variația curentului în diversele puncte ale schemei din figura 9.31 este redată în figura 9.32.

Admițînd ipoteza simplificatoare că selful $L_0$ este de valoare foarte mare, curentul periodic preluat de sistemul chopper poate fi reprezentat printr-o succesiune de creneluri rectangulare care poate fi descompus într-o componentă continuă avînd valoarea medie $i = I\tau/T$ și una alternativă (fig. 9.33). Componenta continuă este furnizată de linie prin intermediul selfului, iar componenta alternativă prin condensator. Pe aceeași figură 9.33 s-a trasat punctat variația celor două componente în funcție de timpul de conducție ($\tau' > \tau$) și creează imaginea proprietății chopperului de a funcționa și în transformator de curent (în curent continuu), proprietate suplimentară față de aceea de transformator de tensiune (în curent continuu) menționată mai sus.

În realitate, selful filtrului ($L_0$) are o valoare finită și ca atare curentul preluat din linie nu este constant (riguros continuu) ci ondulat, a cărei componentă alternativă, de frecvență egală cu aceea de funcționare a chopperului, are ca amplitudine maximă (vîrf-vîrf) valoarea:

$$\Delta i = \frac{i_m}{32}\cdot\frac{1}{L_0C_0}\cdot\frac{1}{f^2}, \text{ unde}$$

$i_m$ este curentul mediu debitat;
$f$ — frecvența de tocare (de funcționare a chopperului);
$L_0, C_0$ — valorile caracteristice ale filtrului.

La rîndul său această componentă alternativă poate ea însăși să fie descompusă într-una sinusoidală fundamentală de frecvență $f$ și curenți armonici de frecvențe multiplu lui $f$. Acești curenți armonici circulînd prin șine pot produce perturbații grave instalațiilor $SCB$ (semnalizare-centrali-

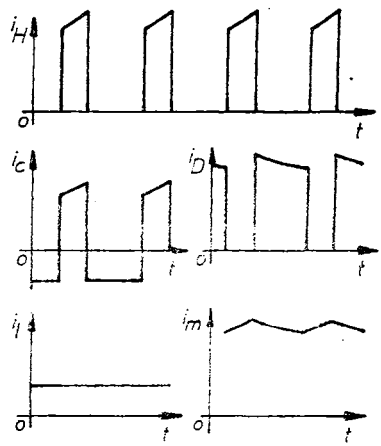


*Fig. 9.32.* Diagrama varaiației curentului în diferitele puncte ale circuitului din figura 9.31.

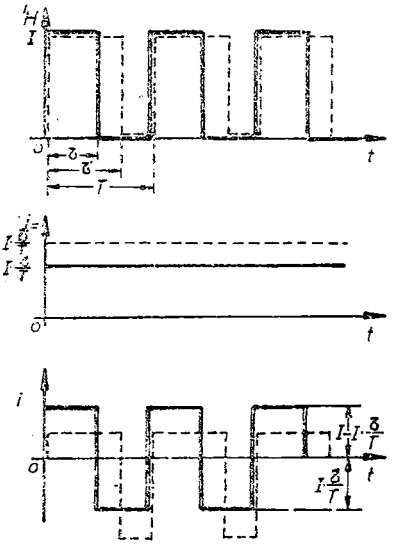


*Fig. 9.33.* Diagrama descompunerii curentului periodic ce trece prin chopper.

zare-bloc) dacă frecvența vreunui curent armonic corespunde cu aceea a circuitului de cale (de regulă circuitele de cale sînt în curent alternativ). De aici necesitatea reducerii ondulației curentului din linie, acționînd asupra parametrilor $L_0$, $C_0$, $f$.

Pentru a evita o dimensionare prea mare pentru filtru ($L_0C_0$) este necesar să se adopte o frecvență mare de lucru ($f$) a chopperului (vezi relația 1), lucru ce se obține folosind anume artificii de schemă ca spre exemplu procedeul de „întrețesere" a $n$ chopper elementare care funcționează fiecare la frecvența $f$ și debitează în paralel pe același receptor (fig. 9.34).

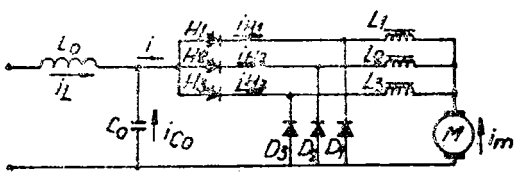


*Fig. 9.34.* Schema „întrețeserii a trei choppere elementare.

Funcționarea chopperelor elementare este regulat decalată în timp, rezultînd variația curenților în diverse puncte ale circuitului ca în figura 9.35.

Dacă $f$ este frecvența de funcționare a fiecărui din cele $n$ choppere elementare, frecvența curentului de ieșire va fi $nf$, iar amplitudinea se va reduce de $n$ ori față de situația cînd s-ar folosi un singur chopper ce va trebui să dea același curent.

În aceste condiții, ondulația maximă a curentului va fi:

$$\Delta i = \frac{i_m}{32} \cdot \frac{1}{L_0 C_0} \cdot \frac{1}{f^2 n^3} \tag{2}$$

Comparînd relațiile (2) și (1) se observă că pentru aceeași valoare a ondulației curentului primar, termenul $L_0C_0$ scade cu cubul numărului chopperelor

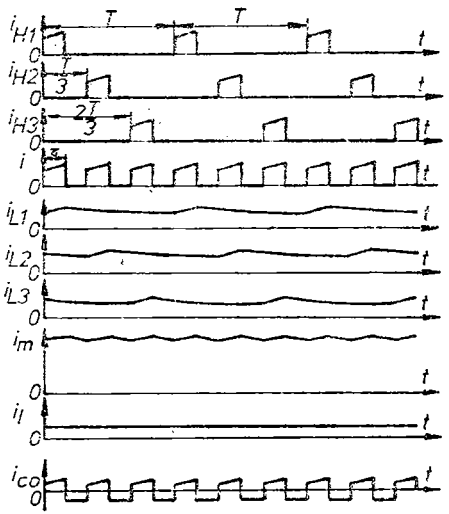
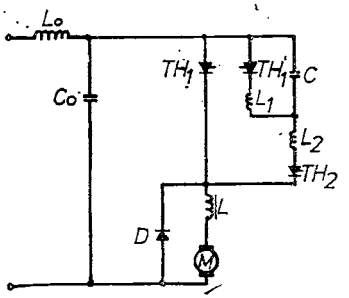



*Fig. 9.35.* Diagrama variației curentului în diferite puncte ale circuitului din figura 9.34.

*Fig. 9.36.* Schema unui dispozitiv de stingere.




întrețesute. Întrucît fiecare chopper elementar furnizează fracțiunea $\frac{i_m}{n}$ a curentului, întrețesarea nu conduce la o supradimensionare în ansamblul chopperului.

Întrerupătorul static al chopperului (fig. 9.28) este alcătuit din tiristoare. Însă, un tiristor amorsat în curent continuu nu se poate stinge (rebloca) decît dacă se anulează curentul ce îl parcurge într-un timp cel puțin egal cu timpul de acoperire după comutația circuitului (timpul denumit „turn-off"). Stingerea se obține cu ajutorul unei surse auxiliare, de caracteristici convenabile, montată în paralel pe tiristorul de stins. O atare sursă este în principal alcătuită dintr-o capacitate, care în prealabil încărcată cu o polaritate convenabilă, se descarcă în circuit la momentul potrivit.

Schema unui circuit de stingere este redată în figura 9.36.

Chopperul este reprezentat prin tiristorul principal $TH_1$ și dioda de buclare $D$. Dispozitivul de stingere este alcătuit din: $C$ — condensatorul de stingere; $TH_1'$ — tiristorul zis de inversare asociat cu selful $l_1$; $TH_2$ — tiristorul de stingere asociat cu selful $l_2$.

Funcționarea dispozitivului de stingere se poate urmări pe figura 9.37.

Presupunem că $C$ este încărcat și are polaritatea (+, —) impusă de linie și că $TH_1$ este blocat (fig. 9.37, *a*).

Aprinderea simultană a lui $TH_1$ și $TH_1'$ provoacă pe de o parte conducția chopperului (închiderea circuitului principal prin $M$ și $L$) și pe de altă parte intrarea în oscilație a circuitului $l_1C$. Cînd curentul oscilator se anulează și apoi se inversează, $TH_1'$ se blochează și polaritatea la bornele lui $C$ este aceea indicată în figura 9.37, *b* (+, —).

Pentru a stinge pe $TH_1$ este suficient a aprinde pe $TH_2$; condensatorul $C$ se va găsi înseriat cu sursa și furnizează curent receptorului (fig. 9.37, *c*). Curentul ce trece prin $TH_1$ se anulează.

După stingerea lui $TH_1$ condensatorul se reîncarcă la tensiunea liniei și $TH_2$ se stinge. Începînd din acest moment, circuitele se găsesc din nou în situația din figura 9.37, *a* și ciclul descris mai sus se repetă.

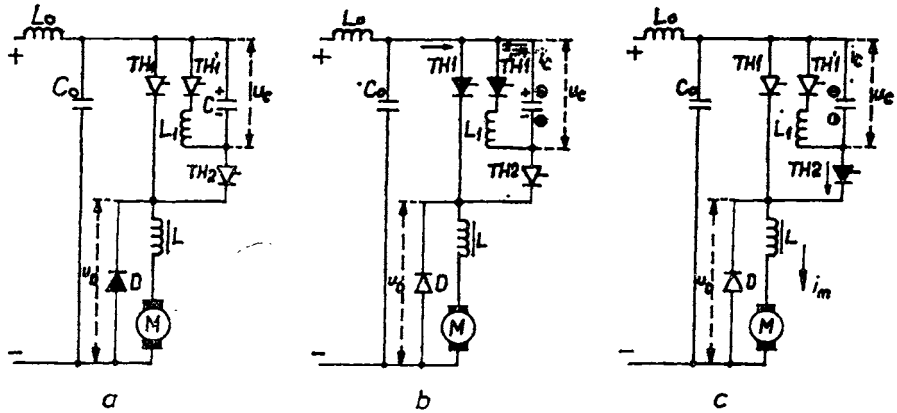



*Fig. 9.37.* Schema funcționării unui dispozitiv de stingere : *a* — $TH_1$ blocat și $C$ încărcat și polaritate +, − ; *b* — $TH_1'$ — blocat și $C$ cu polaritate +, − ; *c* — $TH_2$ aprins și $C$ furnizează curent receptorului.

Ținînd seamă de circuitul de stingere, variația curenților și tensiunilor în diverse puncte ale schemei sînt redate în figura 9.38.

Supratensiunile provocate de capacitatea de stingere nu se transmit motorului (cum ar părea la prima vedere), întrucît datorită selfului de aplatisare (cum s-a menționat mai sus) la motor se aplică numai componenta con-

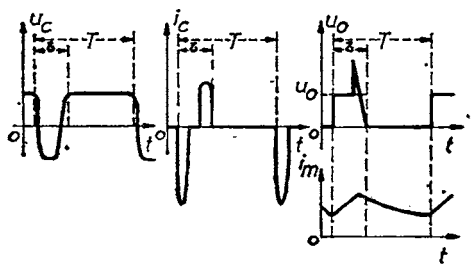



*Fig. 9.38.* Diagrama tensiunilor și curenților în diferite puncte ale circuitului din figura 9.37 (se ține seamă și de circuitul de stingere).

tinuă, iar cea alternativă apare la bornele selfului. Deci funcționarea motorului de tracțiune alimentat de chopper nu prezintă dificultăți particulare față de situația unui motor de curent ondulat de pe locomotivele monofazate cu redresor.

*Caracteristici particulare ale componentelor unui chopper.* Pentru realizarea stingerii tiristorului principal ($TH_1$) capacitatea de stingere ($C$) trebuie să satisfacă neapărat condiția:

$$CU \geqslant I_m t_0; \text{ de unde } C \geqslant \frac{I_m t}{U};$$

$CU = Q$ reprezintă cantitatea de electricitate înmagazinată de capacitatea de stingere ($C$) cînd se încarcă la tensiunea $U$ a liniei;

$t_0$ — timpul „turn-off" al tiristorilor folosiți trebuie să fie foarte mic, de ordinul $t_0 = 20$ μs (față de $t_0 = 200$ μs la cei folosiți pe locomotivele monofazate), adică se utilizează tiristori „rapizi".

În privința diodelor care se folosesc în circuit pentru buclare (închidere), ele nu prezintă dificultăți pentru conducție, însă apar unele inconveniente în privința tensiunii inverse care se dublează (față de valoarea tensiunii de alimentare) în momentul aprinderii lui $TH_2$ și o supratensiune de comutație care se adaugă tensiunii de linie în momentul stingerii, rezultînd din aprinderea lui $TH_1$ (vezi fig. 9.38). Datorită acestui fapt diodele trebuie să fie de tip rapid care dau o supratensiune de comutație relativ slabă. În prezent se fabrică diode de putere cu parametri 600 A și 2500 V tensiune inversă accidentală, așa că problema de mai sus nu constituie un impediment.

*Reglarea continuă a cîmpului inductor a motorului de tracțiune*

La locomotivele clasice de curent continuu se știe că reducerea cîmpului motorului se face prin șuntarea înfășurării de excitație cu cîteva trepte de rezistență (reglare discontinuă), aplicate la fiecare interconectare a motoarelor de tracțiune.

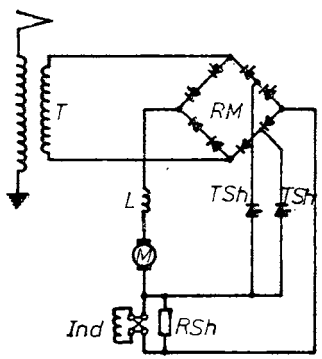



*Fig. 9.39.* Schema reglării continui a cîmpului motorului de tracțiune pe locomotive monofazate cu tiristoare.

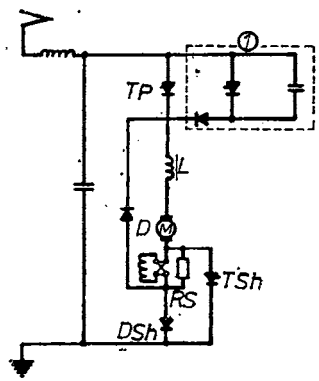



*Fig. 9.40.* Schema reglării continui a cîmpului motorului de tracțiune pe o locomotivă de curent continuu cu chopper. *T.P.*— tiristor principal; *1* — circuit de stingere; $R_s$ — rezistența de șuntare permanentă a excitației; *T.sh* — tiristor de șuntare; *D.sh* — diodă de șuntare (buclarea curentului).

La vehiculele motoare electrice de curent continuu ca reglarea tensiunii în mod continuu prin chopper, este posibil (și se practică) o reglare continuă și a cîmpului motoarelor de tracțiune folosind de asemenea tiristoare.

Reglarea continuă a cîmpului inductor a motoarelor de tracțiune se aplică în ultima vreme și pe locomotivele monofazate cu punți tiristori-

zate (fig. 9.39) și ea stă la bază, ca principiu și pentru realizarea schemei la locomotivele de curent continuu cu chopper.

Aprinderea tiristorului de șuntare ($T.Sh$), în timpul conducției brațului respectiv, permite, începînd din acest moment, de a deriva în afara excitației o parte din curentul ce trece prin indus. Stingerea tiristorului de șun-

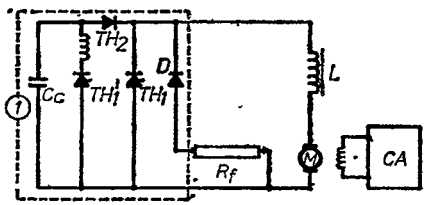



*Fig. 9.41.* Schema de principiu a frînei reostatice pe o locomotivă cu chopper: *1* — chopper; $C_c$ — capacitate de stingere; $R_f$ — rezistență de frînare; *CA* — convertizor auxiliar pentru alimentarea excitației.

tare se produce natural odată cu stingerea tiristoarelor din brațul corespunzător al redresorului.

În figura 9.40 s-a prezentat o schemă de principiu pentru reducerea continuă a cîmpului corespunzătoare unui vehicul motor de curent continuu cu chopper.

Aprinderea tiristorului de șuntaj, permite devierea curentului ce trece prin indus în afara inductorului. Acest dispozitiv nu necesită un sistem propriu de stingere, întrucît este suficient a menține în funcțiune tiristorul principal aproape de deschiderea sa maximă; în această situație tiristorul de șuntaj se stinge în același timp cu tiristorul principal al chopperului.

*Frînarea electrică.* Aceleași componente folosite pentru realizarea chopperului pot fi reutilizate în cadrul schemelor pentru frînarea reostatică sau recuperativă.

Schema de principiu pentru frîna electrică reostatică, pe un vehicul cu chopper, este redată în figura 9.41.

Variind în mod continuu timpul de conducție al chopperului, se va varia de asemenea în mod continuu și valoarea aparentă $R_a$ a reostatului de frînare de la valoarea sa maximă pînă la o valoare practic nulă; $R_a = R\,\frac{T-\tau}{T}$.

Frîna electrică recuperativă se poate realiza după schema de principiu din figura 9.42.

Ansamblul motor self ($M$—$L$) este periodic scurtcircuitat de către chopper. În timpul stingerii chopperului, f.e.m. a inductanței selfului de aplatisare se adaugă celei a mașinii și deci ansamblul funcționează astfel în ridicator de tensiune și debitează pe rețea (linia de contact), prin intermediul filtrului $L_0C_0$ care asigură și reglarea schimbului de energie. De aici se deduce că recuperarea se obține cu tensiuni ale generatorului mai mici decît tensiunea rețelei, spre deosebire de locomotiva clasică de curent continuu unde o condiție a recuperării era $E_{gen} > U_{LC}$.

*Avantajele oferite de folosirea chopperului.* În figura 9.43 s-a reprezentat caracteristica de tracțiune pentru o locomotivă clasică de curent continuu (echipată cu două motoare) și cu reglare prin interconectarea motoarelor, reglare reostatică și reducerea cîmpului în trepte.

Pentru remorcarea unui tren de tonaj dat, pe un profil dat, cu o viteză $V$, locomotiva dezvoltă forța de tracțiune $F$. Dacă punctul $F$, $V$ este situat într-una din aceste plaje, menținerea lui $V$ se obține prin alegerea judicioasă

a unei trepte de mers (cîmp plin sau cîmp redus). Dacă punctul de funcționare se situează în afara plajelor, va trebui să se facă manevre de alternare a cuplajelor, reducerea cîmpului și eventual mers fără curent, ceea ce solicită frecvent echipamentul electromecanic de putere. Din statistici rezultă

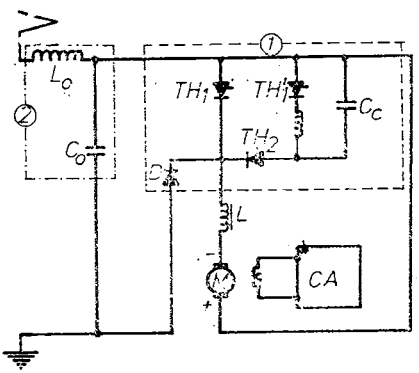



*Fig. 9.42.* Schema de principiu a frînei recuperative pe o locomotivă cu chopper : *1* — chopper ; *2* — filtru.

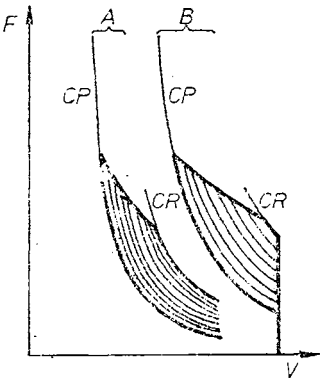



*Fig. 9.43.* Caracteristica de tracțiune a unei locomotive de curent continuu clasică (avînd 2 motoare): *A* — conexiune serie ; *B* — conexiune paralel ; *CP* — cîmp plin ; *CR* — cîmp redus.

că la trenuri rapide, se efectuează cam 8 trepte de mers pe 1 km, ceea ce ar conduce la circa 13 milioane de manevre între două revizii generale ale locomotivei.

În cazul unei locomotive cu chopper și reglare continuă a cîmpului motoarelor de tracțiune orice punct de mers de coordonate $F$, $V$ poate fi găsit în planul $F(V)$ și din punct de vedere al reglării se comportă identic ca o locomotivă monofazată cu tiristoare și ca atare se poate aplica, în aceleași condiții, un sistem automat de reglare a vitezei.

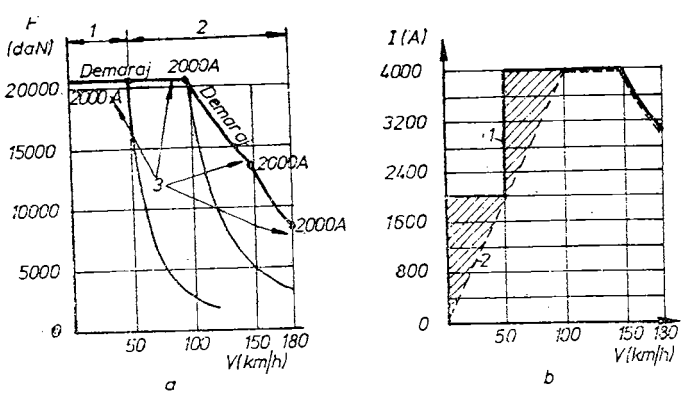



*Fig. 9.44.*Caracteristica de tracțiune la o locomotivă de curent continuu 1,5 kV cu 2 motoare (schemă clasică) :*a* — caracteristica de tracțiune : *1* — conexiune serie ; *2* — conexiune paralel ; *3* — curent pe motor ; *b* — variația curentului absorbit din linia de contact : *1* — locomotiva clasică ; *2* — locomotiva cu chopper.

Şi în privinţa demarajului locomotiva cu chopper prezintă avantaje net favorabile faţă de cea clasică, aşa cum rezultă din diagrama din figura 9.44, unde se arată variaţia curentului absorbit ($I$) în funcţie de viteză pentru cele două tipuri de locomotive. Performanţele de demaraj ale locomotivei cu chopper apar mai pregnant din figura 9.45.

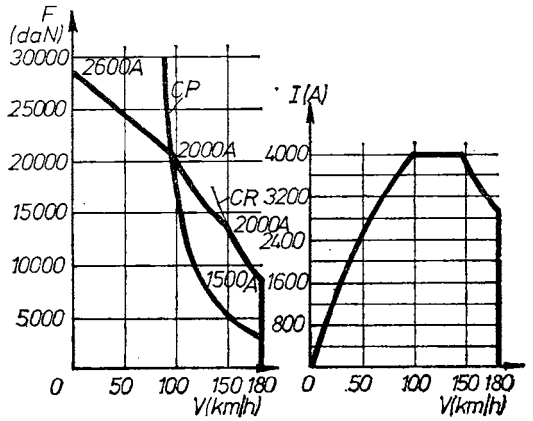



*Fig. 9.45.* Caracteristica de tracţiune şi curentul absorbit din reţea la o locomotivă de curent continuu cu chopper: *CP* — cîmp plin; *CR* — cîmp redus.

9.3.3. **Realizări experimentale de chopper pe locomotive de curent continuu.** Convertizoarele continuu-continuu, cum este şi firesc, au început cu realizări practice de mică putere, ca spre exemplu: 1500 V, 2 kW pentru încărcarea bateriei de acumulatoare; s-a trecut apoi la 1500 V şi 20 kW pentru încărcarea bateriei şi alimentarea excitaţiilor maşinilor în regim de frînă reostatică (cazul LE de curent continuu 1500 V din seriile CC 6500 şi CC 21000 SNCF); în 1966 se semnalizează echiparea LE—BB 9283 (SNCF) cu convertizor 1500 V, 40 kW pentru alimentarea la tensiune reglabilă a grupurilor moto-ventilator; în 1968 s-a realizat un chopper (convertizor continuu-continuu) de 1500 V, 600 kW instalat pe automotorul Z 4203 (SNCF). Pe baza experienţei căpătate cu choppere de putere mereu crescîndă s-a putut trece la realizări experimentale de convertizoare continuu-continuu de mare putere pentru locomotive. Astfel s-a construit un chopper de putere (4 400 kW) cu anexele sale montat pe partea mecanică a unei locomotive *Co—Co* de la care s-au alimentat motoarele de tracţiune ale unei locomotive *Bo—Bo* de curent

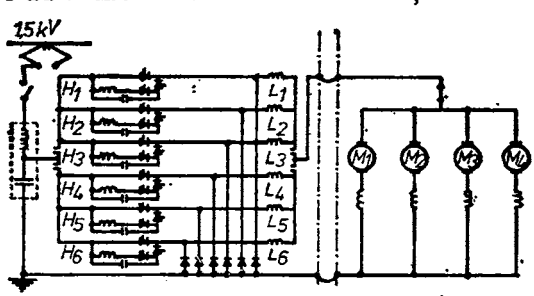



*Fig. 9.46.* Schema de principiu a chopperului pentru o locomotivă Bo—Bo 1,5 kV — 4400 kW.

continuu. Legăturile între locomotive s-au făcut prin cabluri, iar în timpul experimentărilor ambele locomotive circulau cuplate (realizarea aparţine SNCF, în perioada 1971—1972). Schema de principiu a circuitului de forţă este redată în figura 9.46.

Din schemă se observă că chopperul este realizat din două grupe, fiecare grupă fiind alcătuită din 3 elemente (choppere) „întreţesute". Schema mai în detaliu a unei grupe alcătuită din 3 choppere elementare „întreţesute" este arătată în figura 9.47.

Fiecare grupă a fost dimensionată pentru un regim de demaraj 1900 A (2600 A maxim) la viteze mici, ceea ce conduce la o putere de ordinul *5700 kW* la finele perioadei de demaraj.

Caracteristicile componentelor folosite sînt următoarele:

Frecvenţa de funcţionare a chopperului s-a ales $f = 300$ Hz. Reglarea timpului de conducţie a tiristoarelor principale, care determină în final va-

| Funcţia | Tens. inv. max. (V) | Curent med. (A) | -timp „turn-off" (μs) |
|---|---|---|---|
| $TH_1$ (th. principal) | 1 200 | 400 | 25 |
| $TH_2$ (th. stingere) | 1 200 | 400 | 25 |
| $TH_1'$ (th. de inersare) | 1 200 | 400 | 25 |
| $D$ (diodă de buclare) | 2 000 | 500 | 2 |

loarea tensiunii medii aplicată la motorul de tracţiune, se obţine prin decalarea momentului de stingere a acestor tiristoare în raport cu momentul lor de aprindere (amorsare) după principiul de funcţionare indicat în figura 9.48.

Aprinderea tiristoarelor principale, $TH_1$, ca dealtminteri şi a tiristoarelor de inversare $TH_1'$ este provocată la frecvenţa fixată pentru funcţionarea chopperului. În acelaşi moment, şi în consecinţă la aceeaşi frecvenţă, este elabo-

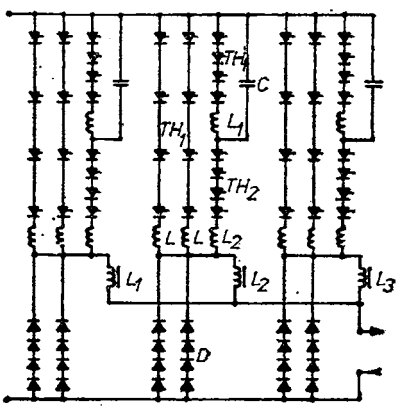



*Fig. 9.47.* Schema unui grup de trei choppere elementare „întreţesute".

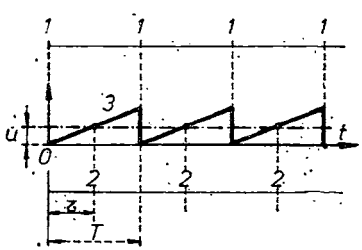



*Fig. 9.48.* Determinarea timpului de conducţie: *1* — aprinderea tiristorului principal $TH_1$; *2* — aprinderea tiristorului de stingere $TH_2$; *3* — tensiunea în dinţi de fierăstrău; $u$ — tensiunea de comandă; $\tau$ — timp de conducţie; $T$ — perioada.

rată o tensiune în dinţi de ferăstrău a cărei comparare cu tensiunea de comandă determină momentul cînd trebuie să se aplice impulsul de stingere pentru $TH_2$. Pentru a permite funcţionarea corectă a procesului de stingere, aprinderea tiristoarelor $TH_2$ nu poate fi provocată în timpul inversării încărcării capacităţii de stingere.

Fiecare chopper elementar are propria sa reglare de curent, afișată prin manipulator și este corectată în permanență prin limitări impuse de tensiunea din linia de contact, sau eventual de tensiunea motorului, sau prin reduceri impuse de dispozitivul antipatinaj. Referința de curent fiind comună celor trei choppere elementare, rezultă egalitatea curenților debitați de fiecare din ei.

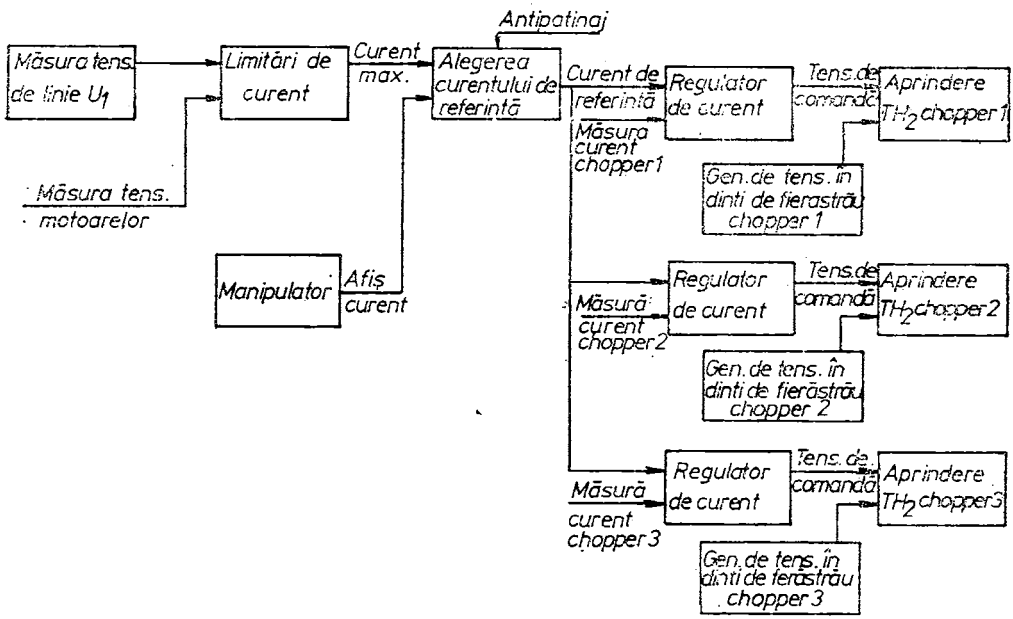



*Fig. 9.49.* Schema bloc funcțională a sistemului de reglare.

Schema bloc funcțională a sistemului de reglare automată este prezentată în figura 9.49.

Întregul echipament și aparataj este grupat, pe specific funcțional, în dulapuri de aparate: blocul choppperelor (5 t), dulapul de comandă electronic al chopperului (1 t), cuva cu selfuri (7 t), condensatorii de filtraj (1, 4 t) ...

Alimentarea serviciilor auxiliare este asigurată de asemenea printr-un convertizor static continuu — continuu de 42 kW (greutate 1,2 t).

Încercările și măsurătorile efectuate cu echipamentul descris mai sus au permis să se tragă unele concluzii asupra submultiplelor de frecvența ce trebuie folosite în perioada de demaraj și oprire pentru realizarea vitezelor joase (acestea se aleg astfel ca să nu interfereze cu frecvență circuitelor de cale; în cazul în speță s-a ales $f/27$, $f/9$, $f/3$, unde $f = 300$ Hz); alegerea filtrelor astfel ca să nu perturbe (datorită armonicelor generate de chopper) instalațiile vecine de radio-telefonie — televiziune ...

Avantajele oferite de folosirea chopperului permit să se întrevadă, sub rezerva scăderii prețului instalației și a dimensiunilor gabaritice, că aceasta va fi în viitorul apropiat concepția vehiculelor motoare de curent continuu.

9.3.4. **Echipament chopper pe metrou.** O asemenea instalație experimentală reprezentativă este realizată pe metroul din Paris, cunoscută sub denumirea *KESAR* (Kommtator electronic secvențial de alimentare și reglare)

la care au colaborat firme tehnice de specialitate de renume (Jeumont-Schneider, Oerlikon-CEM, Alsthom ...)

Avantajele mai importante pe care se contează, aplicînd un asemenea echipament în locul celui clasic (reglaj reostatic), sînt următoarele:

— economie de energie prin eliminarea reostatului de demaraj și posibilitatea aplicării frînei recuperative; pentru un serviciu cu opriri — demarări frecvente (cazul metroului) economia de energie electrică poate ajunge la 20 — 30%;

— diminuarea temperaturii în tunel și în stații (tot din cauza eliminării reostatului);

— micșorarea cheltuielilor de întreținere;

— reglarea fină a demarajului și frînării și ca urmare ameliorarea utilizării aderenței;

— posibilități de adaptare ușoară condițiilor de conducere automată.

Pentru experiment au fost realizate trei prototipuri de vagon motor (1970 — 1971), două pe roți pneumatice și unul pe roți cu bandaje clasice de oțel.

Unul din vagoanele motor (putere 450 kW) este conceput după schema din figura 9.50 și echipat cu trei choppere decalate, fiecare lucrînd la frecvența fixă $f = 300$ Hz și frecvența submultiplu în perioada de demaraj.

Al doilea vehicul are schema cu patru choppere decalate, fiecare lucrînd la $f = 250$ Hz fixă, cu funcționare la frecvențe intermediare în perioada de demaraj (fig. 9.51).

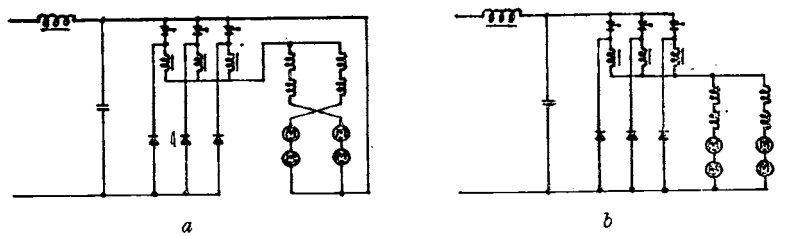


*Fig. 9.50.* Schema de principiu a vagonului motor experimental 1: *a* — tracțiune; *b* — frînare.

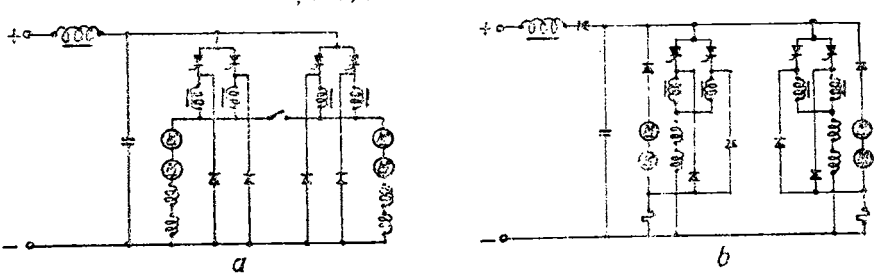


*Fig. 9.51.* — Schema de principiu a vagonului motor experimental 2: *a* — tracțiune; *b* — frînare.

Al treilea vagon motor (450 kW) este realizat după schema din figura 9.52.

Chopperele pot alimenta independent unul sau celălalt din cele două boghiuri. În caz de avarie iese din funcțiune boghiul în cauză, celălalt rămînînd activ. Cele două choppere elementare lucrează fiecare la $f = 500$ Hz.

Cu referire la schemele de principiu sînt de menționat următoarele probleme principale:

— comenzile tiristoarelor echipamentului Kesar sînt toate făcute la frecvență fixă și durată variabilă a conducției;

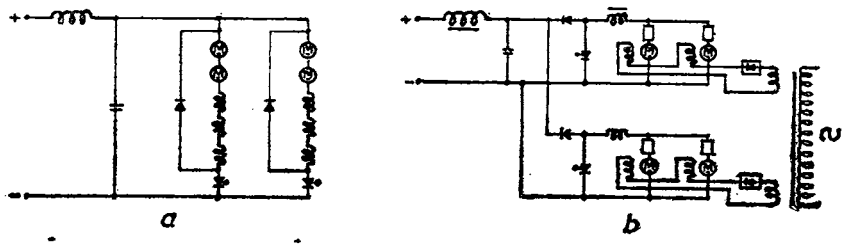



*Fig. 9.52.* Schema de principiu a vagonului motor experimental 3 : *a* — tracțiune; *b* — frînare.

— defazajul chopperelor elementare au ca efect ridicarea frecvenței fundamentale în linie;

— cuplajul în paralel a chopperelor elementare produc o reacție multifazată asupra filtrului, așa că și ondulația tensiunii de ieșire este de asemenea multifazată ceea ce contribuie la reducerea armonicelor curentului din motoare;

— armonicile din linie sînt susceptibile să producă perturbații asupra instalațiilor semnalizare-centralizare-bloc care folosesc circuite de cale în curent alternativ și asupra instalațiilor de telecomunicații. Atenuarea (eventual eliminarea acestor surse de perturbații) acestor perturbații se poate obține prin alegerea judicioasă a frecvenței de „tocare" și a concepției filtrului de rețea.

Ca rezultat al experimentării instalațiilor menționate mai sus s-au tras concluzii favorabile asupra avantajelor menționate pentru aplicarea instalațiilor chopper pe metrou, s-a constatat însă că în stadiul actual prețul unui echipament Kesar, permițînd și frînă recuperativă, este aproape dublu față de cel clasic și de asemenea și greutatea este mai mare (cu peste una tonă). În viitorul apropiat sperîndu-se într-o îmbunătățire a parametrilor componentelor electronice și a scăderii prețurilor lor se așteaptă ca asemenea echipamente să devină soluții generalizate, în locul soluțiilor clasice existente.

## 9,4. TIPURI DE ÎNCERCĂRI ȘI METODOLOGIA DE ÎNCERCARE PENTRU LOCOMOTIVE ȘI RAME ELECTRICE, ÎNAINTE DE DARE ÎN SERVICIU

9.4.1. **Domeniu de aplicare.** În țara noastră sistemul de electrificare a căilor ferate este în curent monofazat 50 Hz, 25 kV, iar ca vehicule motoare există atît locomotive cît și rame electrice ce funcționează în acest sistem. Ca atare, propunerile de metodologie pentru încercări se referă la astfel de tipuri de vehicule motoare electrice.

Pentru simplificare, în textul de mai jos s-a adoptat denumirea „vehicul motor" atît pentru locomotive electrice cît și pentru rame electrice; cînd o

reglementare se referă numai la locomotiva electrică sau numai la ramă electrică, s-a specificat acest lucru în text.

Cu referire la aceste tipuri de vehicule motoare electrice, în țara noastră nu există reglementări în acest sens. Unele norme specifice acestui domeniu, de asemenea nu tratează integral și concret aceste tipuri de vehicule motoare electrice pe calea ferată.

La baza elaborării prezentei documentații au stat în principal următoarele documente:

— norme existente în acest domeniu (IEC — publicația 165/1963; proiect — revizie a publicației 165/IEC—1969; fișe UIC, recomandare OSJD ...);

— parametrii instalațiilor fixe de tracțiune electrică (IFTE) de pe liniile electrificate CFR (pe asemenea linii urmînd a fi făcute încercările în cauză; de altminteri acești parametri sînt valabili în toate țările cu acest sistem de electrificare).

9.4.2. **Categorii de încercări.** Încercările la care urmează a fi supuse vehiculele motoare electrice feroviare, înainte de dare în exploatare sînt următoarele:

9.4.2.1. *Încercări de punere la punct* (aceste încercări incumbă constructorului înainte de a supune vehiculul probelor de recepție alocîndu-se în acest scop un parcurs de cca 5000 km, dacă nu se specifică altcumva în caietul de sarcini).

9.4.2.2. *Încercări de recepție,* care comportă:

— încercări de tip, care se execută în principiu pe o singură unitate a unui model dat;

— încercări de serie, la care pot fi supuse alte unități de construcție identică (se aleg dintre încercările de tip și fac obiectul unui acord între constructor și beneficiar).

9.4.2.3. *Încercări de investigație* (sînt cazuri particulare asupra cărora, ca program și mod de execuție, se cade de acord între constructor și beneficiar).

Dintre aceste categorii de încercări, locomotivele electrice și ramele electrice, înainte de dare în serviciu, *se supun încercărilor de tip* (care dealtminteri formează obiectul prezentei documentații).

Încercările de tip se împart în:

— încercări generale și încercări mecanice;

— încercări electrice.

După felul încercării de tip prevăzută, acestea se execută fie în ateliere, fie pe linie în condiții de exploatare.

Dacă nu sînt prevederi speciale, încercările de tip trebuie să fie efectuate într-un termen de maxim 6 săptămîni de la data cînd furnizorul anunță că vehiculul motor este apt pentru recepție.

9.4.3. **Verificarea gabaritului vehiculului.** În cadrul acestei verificări se controlează dacă dimensiunile exterioare ale vehiculului (deci după asamblarea tuturor elementelor constructive), cu roțile avînd bandaj nou, se încadrează în „gabarit CFR pentru locomotive, tendere și automotoare" — STAS 4392/68, în ipoteza că nu există altă prevedere specială formulată de beneficiar la comandă.

Se va controla de asemenea ca piesele reglabile în funcție de gradul de uzură al bandajelor (plug de zăpadă, grătar frontal, țevăria pentru sablare ...) să fie în poziție corespunzătoare.

9.4.4. **Controlul repartiției sarcinilor pe osii și pe roți.** Acest control constă în următoarele:

— Încercările de greutate se efectuează folosind cîntar special pentru material rulant feroviar;

— Înainte de cîntărire, vehiculul motor va trebui să efectueze parcursuri pe o linie cu declivități, după care nu va trebui să i se facă nici o operație de reglare și ajustare (la suspensie, sau să se modifice artificial — prin loviri sau mișcări — condițiile de așezare ale șasiului cutiei, sau suspensiei). Înainte de efectuarea parcursului, se admit reglări și verificări cu caracter dimensional ale suspensiei;

— Vehiculul motor se va trage la cîntar cu viteză redusă, iar cîntărirea se va face cu atelajele dintre boghiuri deserate și amortizoarele deslegate;

— Se vor efectua 4 operații succesive de cîntărire; după două operații de cîntărire, vehiculul motor se va întoarce cu celălalt capăt la cîntar și se vor efectua celelalte două cîntăriri. În acest mod se presupune că se elimină, pe cît posibil, erorile provenite din imperfecțiunile de echilibraj și frecări.

Se va reține ca valoare a măsurătorilor efectuate, media aritmetică a valorilor înregistrate în cursul celor 4 operații de cîntărire;

— Sarcina măsurată a fiecărei osii nu va trebui să depășească max 1% valoarea admisă „de calea" pe care este destinat vehiculul motor să circule (sarcina admisă de cale se indică de beneficiar, la comandă);

— Greutatea aderentă măsurată, să nu fie inferioară cu mai mult de 1% față de valoarea contractuală;

— Sarcina măsurată pe fiecare osie motoare, să nu depășească cu mai mult de 2% valoarea medie rezultată din măsurătorile tuturor osiilor motoare;

— Sarcina măsurată pe cele două roți ale osiei, să nu difere cu mai mult de 4%.

*Notă* — Toleranțele de mai sus (limite strînse) se înțeleg pentru vehicule motoare cu sarcina pe osie aproape de limita maximă admisă; în alte cazuri (sarcina pe osie sub limita maximă), toleranțele de mai sus pot fi modificate printr-un acord prealabil între constructor și beneficiar, dacă aceste modificări nu conduc la inconveniente.

9.4.5. **Încercarea frînei cu aer comprimat.** Această încercare se face după cum urmează:

*a* — Aceste încercări se efectuează în linie și au drept scop determinarea drumului de oprire (spațiului de frînare) a vehiculului motor.

*Notă.* Înainte de a se trece la efectuarea încercărilor de frînă în linie, constructorului îi incumbă sarcina de a efectua încercările frînei cu aer comprimat la post fix și confirmarea rezultatelor conforme a acestor încercări (forța totală la saboți și randamentul în staționare a timoneriei; toleranțele admise atît la forța totală la saboți cît și la randamentul timoneriei sînt $\pm$ 5% față de cele prescrise în caietul de sarcini; aceste toleranțe se înțeleg pentru timonerii înzestrate cu dispozitiv de reglare a timoneriei).

*b* — Încercările de frînare în linie se efectuează în palier și aliniament pe timp calm cu vehiculul motor izolat; ramele electrice se vor încerca separat fără sarcină și cu sarcina prevăzută.

*c* — Pentru vehiculele motoare la care instalația de frînă este înzestrată cu dispozitiv de reglare a timoneriei (dealtminteri caz general la construc-

țiile actuale), încercările se vor executa cu saboții noi; înainte de probă se va controla ca saboții și saniile de frînă să se aplice bine pe bandaje și să fie suficient rodate.

*d* — Se recomandă efectuarea a trei încercări pentru fiecare regim de seraj.

*e* — La fiecare încercare se va urmări respectarea următoarelor condiții:

● vehiculul încercat va avea viteza, la începutul frînării (la trecerea prin dreptul reperului pentru începerea frînării) egală cu $v_0$ — viteza de referință, considerată $v_{max}$. constructivă (se admite toleranța $\pm$ 3 km/h);

● presiunea aerului în conducta generală va fi cea prescrisă;

— în momentul trecerii prin dreptul reperului pentru începerea frînării, controlerul va fi pe „poziția zero" și robinetul de frînare automată se va trece pe „poziția urgență".

În cadrul fiecărei încercări se va măsura cu exactitate:

● distanța de frînare (spațiul parcurs) *l*, în m;

● viteza *v* (km/h) reală, la începutul frînării;

● se va ridica experimental, dacă este posibil, variația vitezei în funcție de timp pe durata frînării, în scopul determinării grafice a forțelor de decelerație;

● se va verifica, pe cale de înregistrare, ca presiunea să revină la presiunea normală în conducta generală, între fiecare din încercări.

*f* — În ipoteza că traseul ales pentru încercări nu este riguros în palier, se admite ca traseul să fie în aliniament, iar declivitatea să nu depășească $i = \pm 4$ mm/m ($i = \pm 4\,^0/_{00}$). În acest caz distanța de frînare (parcursul de oprire) măsurată se va corecta, folosind relația:

$$l' = l \frac{4{,}24\ v_0^2}{4{,}24\ v^2 \pm il}$$

în care:

$l'$ este parcursul de oprire corectat, în m;

$l$ — parcursul de oprire măsurat, în m;

$v_0$ — viteza inițială de referință, în km/h;

$v$ — viteza inițială reală, în km/h;

$i$ — profilul, în $^0/_{00}$.

În relația de mai sus, se va utiliza semnul + cînd traseul este în pantă și semnul — cînd traseul este în rampă.

*g* — Parcursul de oprire corectat $l'$ (sau cel real, $l$, măsurat dacă traseul este cu $i = {}^0/_{00}$) trebuie să se înscrie în valoarea specificată în caietul de sarcini, pentru fiecare regim de seraj.

**9.4.6. Încercări de etanșeitate globală a instalațiilor de aer comprimat.** Vehiculul motor fiind în condițiile normale de funcționare (cu rezervoarele principale de aer comprimat încărcate la presiunea maximă de lucru), compresoarele oprite și presiunea în conducta generală de 5 bari, se supune la următoarele probe de etanșeitate a instalației de frînă și a celorlalte instalații de aer comprimat.

*a* — Etanșeitatea rezervoarelor principale și a conductei generale.

Robinetul mecanicului se așază pe poziția neutră și timp de 5 min. presiunea nu trebuie să scadă:

● în rezervoarele principale, cu mai mult de 0,3 bar;

● în conducta generală, aparatele de frînă fiind în serviciu cu mai mult de 0,1 bar.

În timpul acestor încercări, pistoanele cilindrilor de frînă nu trebuie să-şi schimbe poziţia.

*b* — Etanşeitatea cilindrilor de frînă.

Cu ajutorul robinetului de frînă direct, se stabileşte presiunea de 3,6 bari în cilindri de frînă. Pentru vehiculele motoare neînzestrate cu frînă directă, se va realiza o frînare de urgenţă cu ajutorul robinetului frînei automate. În ambele situaţii presiunea în cilindri nu trebuie să scadă cu mai mult de 0,1 bar, timp de 5 min.

*c* — Se va efectua o frînare de urgenţă (vehiculul motor oprit) şi se va controla etanşeitatea conductelor de legătură ale triplei valve cu cilindrii de frînă, cu ajutorul unui badijonaj de produs spumant.

Nu va trebui să apară scăpări de aer la orificiile de golire a robinetului mecanicului şi la detentorul de presiune. Organele de frînă neetanşe se vor înlocui.

*d* — Se alimentează frîna şi circuitele serviciilor pneumatice timp de 20 min (dacă nu se specifică altcumva în contract) cînd presiunea în rezervoarele principale nu trebuie să coboare sub valoarea minimă compatibilă cu funcţionarea corectă a aparatajului pneumatic.

**9.4.7. Încercări de etanşeitate a cutiei şi a cofretelor exterioare.** Etanşeitatea cutiei şi a cofretelor de aparataj electric montate în exteriorul cutiei trebuie să fie controlată în dreptul tuturor deschiderilor, uşi, scări (trape), îmbinări (eclisări) ··· susceptibile să lase pătrunderea apei, zăpezii, eventual curenţi de aer în locurile unde acest lucru nu este admis.

Aceste încercări neputînd fi efectuate în exploatare în condiţii concludente, ele vor forma obiectul unui acord între beneficiar şi constructor asupra condiţiilor tehnice şi modalităţi pentru încercări.

*Notă.* Cu ocazia altor încercări de tip pe linie, în ipoteza că în timpul vreunei încercări a avut loc şi o ploaie mai violentă, se vor face observaţii în sensul de mai sus care vor fi semnalate beneficiarului.

**9.4.8. Control privind măsurile de protecţia muncii şi tehnica securităţii.** Se vor verifica dacă toate măsurile prevăzute în proiect pentru protecţia muncii şi tehnica securităţii personalului au fost respectate şi îndeosebi:

— respectarea distanţelor de protecţie faţă de părţile aflate sub tensiune;

— eficacitatea înzăvorîrilor la compartimentele aparatajului de înaltă tensiune şi a existenţei plaselor şi panourilor de protecţie în acest sens;

— eficacitatea blocărilor privind scoaterea scării de acces pe acoperiş, sau a surselor exterioare pentru alimentarea circuitelor de joasă tensiune;

— punerea la pămînt (circuitul de retur) a echipamentului electric;

— existenţa şi eficacitatea dispozitivelor de punere la pămînt a liniei de contact (prăjini, conductoare, cleme ...), precum şi a separatoarelor pentru echipamentul de acoperiş.

**9.4.9. Încercări de înscriere în curbă şi la trecerea peste cocoaşe de triere.** Aceste încercări se efectuează în felul următor:

*a* — Se va trece vehiculul motor printr-o curbă cu raza minimă, supraînălţare, supralărgire şi viteza prescrisă de beneficiar la comandă, cu care ocazie se vor verifica:

— înscrierea vehiculului neforţată, fără şocuri şi fără deformaţii permanente ale căii;

— cablele electrice de conexiuni, conexiunile pentru returul curentului, conductele de cuplare pneumatică ... , dacă au o lungime suficientă și nu trag de îmbinări;

— canalele de ventilație se comportă astfel ca să nu conducă la avarii.

*b* — Se va plasa vehiculul motor în vîrful unei cocoașe de triere cu raza în plan vertical de circa $R = 250$ m;

— Se controlează conexiunile motoarelor de tracțiune, conexiunile circuitului de retur, legăturile cablului de încălzire ... din punct de vedere mecanic al prinderii papucilor și a lungimii suficiente a legăturilor (nu trebuie să tragă de punctele de prindere și fixare);

— Același control se efectuează la suporții de prindere ai canalelor de ventilație și la acestea însăși;

— Punctele tari de prindere mecanică, precum și lungimea legăturilor nu trebuie să prezinte situații ce ar putea da naștere în timpul circulației la avarii de această natură.

*Notă.* Traseul și cocoașa pentru încercări se vor indica de beneficiar.

9.4.10. **Verificarea condițiilor de confort și comoditatea lucrului.** Această verificare constă în verificarea cabinelor de conducere și a vehiculelor motoare care comportă și compartimente de călători.

*a* — Cu privire la cabinele de conducere ale vehiculului motor se va verifica:

— vizibilitatea în exterior să fie perfect asigurată și că mecanicul, de pe locul normal de conducere, să poată ușor vedea calea și semnalele (fără să fie jenat de montanți, de reflexii ale suprafețelor lucioase la lumina zilei, sau iluminate artificial), fără să fie obligat să ia poziții anormale care să conducă la o tensiune nervoasă excesivă sau la eforturi permanente ale vederii;

— aparatele de măsură și lămpile de semnalizare să fie perfect vizibile atît la lumina zilei cît și la iluminat artificial și fără să producă reflexii ce ar împiedica vizibilitatea spre exterior;

— lămpile de semnalizare și în general toate obiectele iluminate artificial să nu producă reflexii în parbriz care să creeze iluzii optice ce ar împiedica vizibilitatea clară a semnalelor;

— diversele organe de comandă să se manevreze ușor, deci să nu ceară eforturi susceptibile de a provoca fie o imprecizie în manevră, fie o oboseală fizică anormală;

— încălzirea și ventilația (condiționarea aerului) să corespundă prevederilor proiectului;

— ștergătoarele de parbriz și instalația de dezaburire să lucreze corespunzător, în condițiile de funcționare cele mai defavorabile;

— nivelul de zgomot să nu depășească valorile fixate de reglementările în vigoare (fișa UIC 617.0).

*b* — Vehiculele motoare care comportă și compartimente de călători (cazul ramelor electrice) trebuie să îndeplinească unele condiții legate de confort;

— iluminatul mediu prevăzut, este asigurat;

— echipamentul de încălzire (condiționat aerul), respectă condițiile prescrise în caietul de sarcini;

— vibrațiile produse de unele grupuri (compresor, ventilator ...) să nu fie sursă jenantă pentru călători.

9.4.11. **Verificarea instalațiilor de siguranță.** Se va controla funcționarea corectă și corespunzătoare a tuturor instalațiilor de siguranță, prevăzute pe vehiculul motor; ca exemplificare se citează:

— dispozitivul de vigilență;
— dispozitivul de oprire automată a trenului ;
— avertizările luminoase și sonore;
— indicatoarele de viteză;
— dispozitivele de avertizare a incendiului.

9.4.12. **Încercări de stabilitate la mers.** Vehiculul motor va efectua parcursuri, de regulă pe linii destinate a face serviciu în exploatare (acestea se vor indica de beneficiar), cu vitezele normale din graficul de circulație, precum și viteza maximă constructivă. În cursul acestor probe se va urmări și controla în principal:

— siguranța la mers;
— stabilitatea la mers.

Siguranța la mers este caracterizată prin următorii parametri:

- siguranța contra deraierii;
- siguranța contra ripării liniei;
- siguranța contra solicitărilor importante asupra căii și elementelor sale de fixare, asupra roților, osiilor ...

Stabilitatea la mers se caracterizează în general prin valorile accelerațiilor în cele trei direcții (longitudinal-transversal-vertical) ale cutiei, boghiurilor și osiilor.

Valorile limită ale diferitelor forțe, raporturi de forțe, accelerații ... pentru verificarea siguranței la mers și a stabilității se vor fixa de beneficiar în funcție de tipul și starea de întreținere a căii.

La cererea beneficiarului, încercările de mai sus pot fi repetate după un oarecare parcurs sau timp de utilizarea în exploatare (de exemplu 100 000 km, sau un an). În această perioadă vehiculului motor nu i se vor face decît lucrări aferente întreținerii normale. Înlocuiri de piese sau rectificări a unor subansamble nu se vor putea face decît cu acordul beneficiarului. Furnizorul are dreptul de a supraveghea prin reprezentanții săi, în perioada de garanție întreținerea vehiculului motor.

9.4.13. **Încercări privind captarea curentului.** Prin aceste încercări se urmărește funcționarea corespunzătoare a captării curentului:

— Se controlează presiunea statică a pantografului și starea plăcuțelor de frecare înainte de ieșirea vehiculului motor din depou;

— Se efectuează curse cu locomotiva electrică la tren (pot fi folosite cursele pentru încercare în regim de durată), sau cu rama electrică, la vitezele normal admise, urmărindu-se ca în parcurs să se atingă și viteza maximă constructivă;

— Se va efectua și o probă pe linia destinată să efectueze serviciu vehiculul motor cercetat, pe timp calm și cu viteza maximă constructivă. În timpul circulației cu viteza maximă constructivă se va da și o comandă de coborîre și urcare a pantografului;

— La fiecare oprire din probă se va cerceta pantograful în sensul că a funcționat normal în limitele înălțimii de lucru a pantografului, a zigzagului firului de contact și a presiunii admise;

— Starea plăcuțelor de frecare (știrbituri, rizuri, puncte de topituri ale firului de contact ...);

— Control vizual asupra captării curentului, în timpul circulației, captarea va trebui să se facă fără scîntei dăunătoare în perioada de demaraj și în regim de tracțiune.

— Verificarea forței aerodinamice a pantografului la viteza maximă constructivă (se va folosi o instalație dinamometrică cu care se va măsura în timpul circulației la viteza maximă suma forței statice și a componentei aerodinamice cu sania pantografului menținută la cca 10 cm distanță de firul de contact; măsurătoarea forțelor se va face în axul pantografului);

— Pantograful va trebui să execute în mod normal cursele de coborîre și urcare, în viteză;

— Recomandările UIC-fișa 606 prevăd ca presiunea statică a pantografului să fie cuprinsă între 6—8 kgf;

— Aceleași recomandări prevăd ca forța aerodinamică să nu depășească 12 kgf la $V = 160$ km/h (forța aerodinamică poate fi apreciată cu variație lineară în funcție de viteză).

9.4.14. **Încercări pentru verificarea (stabilirea) rezistenței la mers** (scopul încercării, traseul și metoda de încercare);

— Încercarea are drept scop verificarea relației pentru calculul rezistenței la mers a vehiculului motor (dacă aceasta este furnizată de constructor), sau stabilirea acestei relații în condițiile specifice de exploatare pe liniile căilor ferate române;

— Încercările se efectuează pe un traseu de profil cunoscut de regulă generală în palier și aliniament, pe cît posibil adăpostit și pe timp calm;

— Metoda de încercare (metoda lansării de la viteza maximă la viteza zero, fără acționarea frînei; metoda folosirii unui vagon dinamometric utilat în consecință ...) se va alege de acord între beneficiar și furnizor.

9.4.15. **Verificarea circuitului de retur.** Se efectuează în modul următor:

— Se va verifica buna execuție a legăturilor elementelor legate la masă și a șunturilor menite să sustragă articulațiile (respectiv rulmenții) efectelor curentului de retur;

— Conexiunile flexibile de cupru vor trebui să aibă secțiunea prescrisă și lungime care să aigure deplasările maxime a organelor racordate (fără să tragă de prinderi);

— Legăturile la masă trebuie astfel dispuse încît să poată fi ușor accesibile pentru control;

— În cazul conexiunilor sudate, acestea vor fi bine executate în ceea ce privește realizarea sudurilor.

9.4.16. **Încercarea de tracțiune la regim uniorar**

*a* — Se creează pentru locomotiva electrică de încercat un regim de tracțiune astfel ca să lucreze timp de una oră, în care motoarele de tracțiune să fie parcurse de curentul uniorar. Regimul de tracțiune se poate realiza cu locomotiva electrică în capul unui tren de marfă, iar în corpul trenului se include încă o locomotivă electrică înzestrată cu frînă electrică reostatică.

Menținerea valorii curentului uniorar se va face prin frînarea electrică reostatică de către locomotiva din corpul trenului în care scop se va instala un ampermetru pe pupitrul acesteia care va măsura curentul din motorul locomotivei de încercat care lucrează în regim de tracțiune.

— Temperatura mediului ambiant se va măsura cu ajutorul unui termometru plasat în interiorul unui canal de ventilație din apropierea prizei de

aer a locomotivei. Pentru control, se va instala și un termometru plasat în exteriorul peretelui locomotivei sau a vagonului de măsurători.

— În timpul probei se recomandă a fi măsurate și înregistrate și alte mărimi și parametri (forța de tracțiune și viteze de mers, tensiune și curent primar, putere primară, consum de energie, tensiune și curent pe motorul de tracțiune ...). În acest scop este necesar a fi introdus și un vagon dinamometric dotat cu aparatura necesară măsurătorilor preconizate.

*b* — După terminarea regimului uniorar se oprește locomotiva și se deconectează ventilatoarele pentru răcitorul uleiului trafo, și ventilatoarele pentru răcirea forțată a motorului de tracțiune, după care imediat se măsoară:

— temperatura mediului ambiant;

— temperatura uleiului trafo (cu termocuple instalate anterior începerii regimului de încercare în cuva transformatorului și pentru comparație se citește și termometrul de ulei — dacă există);

— temperatura motorului de tracțiune cercetat, la indus-stator-colector (prin termo-cuple instalate anterior, sau folosind termometru electric);

— examinare vizuală a comportării motorului de tracțiune după încercare, sub aspectul de a nu prezenta deteriorări mecanice la colector, înegriri sau urme de flame la colector ...

*c* — Limite de încălzire ale motorului de tracțiune, conform normelor internaționale:

| Clasa de izolație | Partea motorului | Metoda de măsură | Temp. limită °C | Obs. |
|---|---|---|---|---|
| *F* | indus | rezistență | 140 | Valabil pentru regim uniorar și de durată |
| | stator | „ | 155 | |
| | colector | termom. electr. | 105 | |
| *H* | indus | rezistență | 160 | |
| | stator | „ | 180 | |
| | colector | termom. electr. | 105 | |

*Notă:*

*a* — Dacă temperatura mediului ambiant este cuprinsă între + 10°C și + 40°C **nu** se operează corecții asupra limitelor din tabel.

*b* — Pentru înfășurările de cupru, dacă se folosește metoda de măsură prin rezistență, încălzirea la sfîrșitul încercării se determină cu relația:

$$t_2 - t_a = \frac{R_2}{R_1}(235 + t_1) - (235 + t_a), \text{ unde:}$$

$t_a$ este temp. în °C a aerului de răcire la finele încercării;

$t_2$ — temp. în °C a înfășurării la finele încercării;

$t_1$ — temp. în °C a înfășurării la rece, în momentul măsurării inițiale a rezistenței;

$R_2$ — rezistența înfășurării la sfîrșitul încercării;

$R_1$ — rezistența înfășurării la rece, măsurată inițial (la începutul experimentării).

*c* — Limitele de încălzire ale uleiului trafo, conform normelor internaționale:

Pentru clasa *A* de izolație a înfășurărilor (caz general la trafo), se admite supratemperatură . . . . . 65° C.

9.4.17. **Încercarea de tracțiune la regim de durată.** Se creează pentru locomotiva electrică un regim de tracțiune astfel ca să lucreze timp de 3—4 ore în care motoarele de tracțiune să fie parcurse de curentul de durată. Regimul de tracțiune se poate realiza în modul propus în cadrul „încercării de tracțiune la regim uniorar", cu mențiunea că este recomandat ca trenul să fie alcătuit special pentru probă (nu un tren din trafic), în scopul efectuării timpului de parcurs fără oprire și pentru a se putea aloca un tonaj convenabil asigurării mai ușoare a sarcinii nominale a motorului de tracțiune, fără a solicita locomotiva electrică din corpul trenului prea mult în regim de frînă.

Celelalte condiții tehnice și limite de temperaturi, idem ca la „încercarea de tracțiune în regim uniorar"

9.4.18. **Încercări de demaraj și accelerare.** Dacă vehiculul motor a satisfăcut încercările de capacitate de tracțiune (încercarea de tracțiune la regim uniorar și la regim de durată), acestea pot fi considerate ca satisfăcînd în general și încercările de demaraj.

Suplimentar se vor efectua următoarele probe:

— verificarea valorii forței de tracțiune (după caracteristica de tracțiune $F_0(V)$ a vehiculului motor); valoarea forței de tracțiune se va deduce fie prin măsurarea curentului din motorul de tracțiune, fie din înregistrările directe cu vagonul dinamometric;

— în cazul ramelor electrice se va verifica și valoarea accelerației medii care se va încadra în aceea prevăzută în contract;

— în perioada de demaraj, trecerile de la o treaptă de reglare la următoarea să aibă loc astfel ca vîrfurile de curent ce se produc în motoare să nu depășească valoarea maximă a curentului pe motor prescrisă;

— la finele perioadei de încercare se va examina vizual starea cablelor de conexiuni și punctele de fixare (la papuci), care nu vor trebui să prezinte urme vizibile de supraîncălzire sau deformații în punctele de prindere.

9.4.19. **Încercarea de suprasarcină a motorului de tracțiune.**

— Vehiculul motor se menține în poziția oprit și se va frîna convenabil (se folosește frînă cu aer comprimat);

— Se menține un singur motor de tracțiune în circuit (celelalte se deconectează), pe motorul cercetat se controlează anticipat reglarea protecției maximale de curent și se prevede oscilografierea curentului de sarcină);

— Se trece rapid controlerul de la poziția zero spre poziția ultimă (se mărește sarcina în motorul de tracțiune) pînă intră în acțiune dispozitivele de protecție;

— Proba de mai sus se repetă de 3 ori însă între două probe consecutive ţe va mișca vehiculul motor cîțiva metri (o mică rotație a motorului de tracsiune);

— Se recomandă efectuarea unei încercări cu toate motoarele conectate (așa cum lucrează vehiculul motor în exploatare); motorul de încercat se lasă cu protecția maximală de curent reglată normal; la celelalte motoare se reglează protecția cu 10—15% mai sus (va trebui să lucreze numai protecția motorului de încercat).

După efectuarea acestor încercări se va controla:

— dacă protecția maximală de curent a motorului încercat a lucrat corect;

— nu va trebui să se constate vreo anomalie la releul maximal de curent;

— colectorul motorului încercat nu va trebui să prezinte anomalii (înegriri locale excesive; puncte de topitură; urme de flamări puternice);

— oscilograma curentului de sarcină, din care să rezulte valoarea curentului la care a lucrat protecția.

9.4.20. **Încercarea la scurtcircuit a întrerupătorului automat principal.** După instalarea dispozitivelor de protecție la scurtcircuit și suprasarcini, se recomandă încercarea lor în scopul asigurării că aptitudinea acestor dispozitive de a elimina curenții de defect nu a fost alterată prin modul de instalare pe vehiculul motor.

— Încercarea se execută sub linia de contact cu vehiculul motor plasat în apropierea unei substații de tracțiune ($U_{LC}$ mare și reactanța totală mică) și a doua serie de încercări cu vehiculul motor la capătul consolei liniei de contact ($U_{LC}$ minim, respectiv $\Delta U_{LC}$ în serviciu maximă).

Fiecare încercare (în fiecare din amplasamentele vehiculului motor) se va executa de 3 ori.

— Puterea de scurtcircuit la barele 25 kV ale S.T. ce alimentează scurtcircuitul efectuat pe vehiculul motor, nu va depăși 250 MVA (cît este puterea de rupere a întrerupătorului automat principal).

— Legătura artificială de scurtcircuit spre pămînt se va executa în aval de întrerupător (pentru ca protecția întrerupătorului să lucreze).

— Realizarea propriu-zisă a scurtcircuitului va respecta necondiționat următoarea succesiune a operațiilor:

- odată vehiculul motor ajuns la punctul de încercare se deconectează întrerupătorul automat și se coboară pantografele;
- se cere scoaterea liniei de contact de sub tensiune prin deconectarea automatului (din S.T) ce alimentează zona fider pe care se află vehiculul motor de încercat;

— se instalează prăjinile de legare la șină, a liniei de contact de o parte și de alta a vehiculului motor;

— se execută legătura artificială de scurtcircuit spre pămînt (șină) a întrerupătorului;

- se scot prăjinile de legare a L.C. la șină;
- se închide (din S.T) automatul de fider peste vehiculul motor scurtcircuitat.

— Intervalul de timp între două încercări de scurtcircuit consecutive, nu va depăși 5 min.

— Se va oscilografia curentul de scurtcircuit (evident pe partea 25 kV), cu posibilitatea măsurării valorii curentului de scurtcircuit și a timpului global de declanșare a întrerupătorului automat.

Pe baza încercărilor de mai sus se va cerceta în principal:

— dacă întrerupătorul a declanșat la fiecare scurtcircuit efectuat;

— se va controla dacă nu au apărut anumite anomalii (deplasarea aparatului, degajări de flame periculoase în apropierea elementelor de rupere, amorsări de arcuri electrice sau arsuri ...).

La sfîrșitul încercărilor pot fi tolerate peluri (mici bobițe), sau ușoare înnegriri ale contactelor, însă nu de natura de a compromite funcționarea mecanică și electrică regulată a aparatului.

— Valoarea curentului de scurtcircuit și timpul de declanșare.

**9.4.21. Încercări de funcționare a motoarelor serviciilor auxiliare**

— Fiecare serviciu auxiliar se supune la 6 probe complete și consecutive de demaraj. În ipoteza că există comutator de tensiune maximă și minimă se vor efectua 3 demaraje cu comutatorul pe poziția tensiune maximă și 3 demaraje cu comutatorul pe poziția tensiune minimă.

— Durata fiecărei probe se va limita la timpul strict necesar de punere în viteză (de la turația zero la turația nominală a agregatului) și oprire.

— Fiecare din aceste încercări trebuie să fie suportate de mașini fără deteriorări mecanice, urme periculoase de flame, urme permanente susceptibile de a influența defavorabil buna funcționare a mașinii.

**9.4.22. Încercarea la scurtcircuit a motoarelor serviciilor auxiliare**

— Încercările la scurtcircuit a motoarelor serviciilor auxiliare se fac în scopul de a verifica dispozitivele de protecție proprii ale motorului scurtcircuitat și influența curentului de scurtcircuit asupra elementelor de protecție din circuitul barelor generale de alimentare a serviciilor auxiliare.

— Pentru încercări este de recomandat să se aleagă un motor de putere mică (de exemplu un motor al ventilatorului pentru motorul de tracțiune și un motor de putere mare (de ex. motorul compresorului).

— Scurtcircuitul se va provoca la bornele de intrare ale motorului de încercat (pentru ca protecția maximală de curent să lucreze), după ce toate agregatele serviciilor auxiliare sînt în funcțiune la regim stabilizat, inclusiv agregatul cercetat. Pentru efectuarea scurtcircuitului artificial se va folosi un contactor corespunzător ca parametri tehnici;

— Dacă în mod expres se cere efectuarea a mai multor probe de scurtcircuit la același motor, intervalul de timp între două probe nu va depăși 5 min.

— Se va instala aparatura necesară pentru măsurarea și oscilografierea curenților și tensiunilor la motorul încercat și a curenților și tensiunilor la barele generale de alimentare a serviciilor auxiliare.

După efectuarea acestor încercări se va cerceta, în principal:

— Modul de lucru al protecției maximale de curent și starea contactelor contactorului;

— Se controlează întreaga aparatură din circuitul motorului scurtcircuitat;

— Se analizează influența curentului de scurtcircuit asupra tensiunilor și curenților din barele generale ale serviciilor auxiliare.

**9.4.23. Încercarea la scurtcircuit a redresorului.** Prezenta încercare se aplică numai vehiculelor motoare electrice care au o astfel de instalație realizată cu diode siliciu montate în punte. Scopul acestei încercări este de a verifica pe de o parte protecția punții redresoare, iar pe de altă parte aptitudinea punții de a suporta regimurile tranzitorii ale cercurilor de foc ce apar la colectorul motorului de tracțiune în exploatare (acestea echivalează cu un scurtcircuit tranzitoriu la redresor).

— La scurtcircuit se încearcă puntea de redresare aferentă unui singur motor de tracțiune; restul motoarelor de tracțiune se deconectează.

— În circuitul punții de redresare ce se încearcă, motorul de tracțiune se deconectează și se substituie cu o rezistență ohmică de valoare astfel ca să permită trecerea unui curent egal cu $I_{max}$ motor.

— Scurtcircuitul punții de redresare se va face cu selful de aplatisare în circuit și anume în aval de self (situația normală în exploatare).

— Înainte de provocarea scurtcircuitului se trece prin blocul redresor-rezistență $I_{max.motor}$ timp de 1 min (această condiție conduce la situația de

a avea diodele calde, cînd ele suportă suprasarcini mai reduse); ventilatorul punții de redresare se va menține în funcțiune la regimul său nominal de lucru.

— Se recomandă a se efectua 3 probe de scurtcircuit a punții de redresare, începînd cu o poziție mică a graduatorului, următoarea cu graduatorul pe o poziție mijlocie și apoi pe ultima treaptă a graduatorului (pe această treaptă reactanța trafo fiind minimă conduce la valoarea maximă a curentului de scurtcircuit). Se va elabora în prealabil un calcul orientativ al curenților de scurtcircuit corespunzători acelorași trepte ale graduatorului, pentru a se putea face comparația cu valorile măsurate și a se decide trecerea la încercarea următoare.

În ipoteza că vehiculul motor nu este înzestrat cu sistem de reglare a tensiunii prin graduator (cazul punților tiristorizate) încercarea de scurtcircuit a punții se face numai o singură dată.

— Se măsoară (se oscilografiază) curentul de scurtcircuit pe punte și se înregistrează timpul de declanșare a protecției.

— După fiecare probă de scurtcircuit se verifică individual toate diodele punții de redresare încercată, cu aparatură specială scopului (osciloscop). Numai în caz că toate diodele sînt în stare normală se poate trece la proba următoare.

— Asupra condiției considerate cea mai dificilă pentru această încercare (poziția vehiculului motor față de S.T., numărul trafo din S.T. · · ·) se va cădea de acord în prealabil între beneficiar și furnizor.

**9.4.24. Verificarea dispozitivelor de încărcare a bateriei de acumulatori.** Diversitatea dispozitivelor existente pentru încărcarea bateriei de acumulatori de pe vehiculele motoare ca și condițiile diferite de satisfăcut în serviciu, nu permit stabilirea unor reglementări precise care să acopere toate cazurile posibile. Asemenea reglementări de încercări se vor stabili de la caz la caz printr-un acord prealabil între beneficiar și furnizor.

Recomandări de ordin general asupra încercării dispozitivelor de încărcare a bateriei:

— Furnizorul trebuie să definească criteriile pentru stările „baterie complet încărcată" și „baterie complet descărcată", pentru tipul de baterie instalat pe vehiculul motor;

— Asupra „bateriei complet descărcate" se va pune în funcțiune dispozitivul de încărcare timp de max. 10 ore; în acest timp circuitele de utilizare (alimentate din baterie) se vor dispune astfel ca să absoarbă un curent mediu echivalent cu cel din exploatare.

Se va controla, în această perioadă valoarea curentului de încărcare care trebuie să fie în limitele prescrise atît pentru baterie cît și pentru dispozitivul de încărcare.

După această perioadă, dispozitivul de încărcare se deconectează și se va pune bateria să debiteze pe circuitele alimentate din ea, un timp convenit între beneficiar și furnizor; la finele acestei încercări tensiunea bateriei nu va coborî sub valoarea minimă prescrisă (dacă este cazul, se va reglementa și asupra densității electrolitului).

— Se va efectua și o încercare pentru „încărcare completă" după care timpul de încărcare se va prelungi cu 3 ore cu circuitele de utilizare dispuse pentru curentul nominal; în această perioadă se va controla ca degajarea gazoasă a electrolitului să nu prezinte anomalii.

9.4.25. **Încercări de funcționare a aparatajului.** Aceste încercări au drept scop verificarea funcționării corecte, în limitele normale de presiune a aerului și de tensiune a circuitelor de comandă, a întregului aparataj din circuitul de tracțiune și din circuitele serviciilor auxiliare de înaltă și joasă tensiune (încălzire, compresoare, ventilatoare, iluminat, închiderea ușilor, manevră, pantografe ...).

În particular se va verifica funcționarea corectă a aparatajului pneumatic, în sensul de a nu fi împiedicată în funcționare de eventuale obturații (strangulări de secțiune) de pe conductele de alimentare.

De asemenea se va verifica reglajul (în limitele prescrise) aparatajului de protecție (relee, presostate, termostate ...).

Pentru un vehicul motor destinat să funcționeze în unități multiple (cuplat cu alte vehicule motoare identice) și comandă de la o singură cabină de conducere, se va verifica în principal:

— posibilitatea ușoară de comandă, de la un singur post de comandă, a întregului aparataj necesar regimului de mers pentru toate vehiculele motoare cuplate;

— aparatajul de control și măsură (ampermetre, voltmetre, lămpi semnalizare ...), supravegheat de mecanic și destinat să dea indicații pentru toate vehiculele cuplate (inclusiv rame) trebuie să funcționeze corect și să răspundă bine condițiilor de exploatare impuse la comandă;

— aparatajul de control al compresoarelor (presostate-contactoare-relee...) să lucreze corect.

9.4.26. **Încercări ale frînei electrice.** Pentru vehiculele motoare echipate cu frînă electrică, se vor face, în principal, următoarele verificări:

— în regim de frînare electrică pentru încetinire, reducerea vitezei obținută cu tonajul maxim remorcat să corespundă condițiilor impuse;

— în regim de frînare electrică de menținere a vitezei pe pante, frînarea realizată să corespundă caracteristicilor de frînare livrate de furnizor;

— în timpul frînării, valoarea tensiunii la bornele motoarelor (devenite generatoare), ca și curentul de frînare să nu depășească valoarea prescrisă;

— după executarea unei succesiuni de încercări de frînare electrică, asupra cărora s-a căzut de acord în prealabil între beneficiar și furnizor, se vor examina motoarele de tracțiune și aparatajul principal din circuitul de frînare care nu vor trebui să prezinte urme periculoase sau deteriorări;

— ventilarea forțată a rezistențelor de frînare funcționează normal;

— dispozitivele de protecție lucrează eficace (în special cele pentru dispariția curentului de frînare și la căderea tensiunii din linia de contact);

— nu se produc autoexcitații neobișnuite;

— factorul de putere să rămînă în limite acceptabile.

9.4.27. **Încercări de verificarea unui parcurs tip.** Această încercare se efectuează numai în cazul că este convenită în mod expres între beneficiar și furnizorul vehiculului motor, cu care ocazie se vor fixa secția de remorcare, tonajul nucleu (sarcina utilă în cazul ramelor electrice) și toate condițiile considerate necesare de îndeplinit.

În cadrul acestor încercări se verifică: viteza tehnică, viteza comercială, vitezele pe porțiuni elementare de traseu, precum și timpii de mers, care trebuie respectate în condițiile prevăzute la comandă.

Pentru aceste încercări se recomandă folosirea unui vagon dinamometric utilat corespunzător.

# *Bibliografie*


1. Condacse, N., *Locomotive electrice.* M.C.F., Centrul de documentare și publicații tehnice, București, 1966.
2. Condacse, N., Popa, Al., *Locomotive* (Manual pentru licee de specialitate), Editura didactică și pedagogică, București, 1975.
3. Turbuț Gh., *Locomotive electrice* (vol. I, II, III, IV). Centrul de documentare și publicații tehnice, București, 1971 ... 1974.
4. Nouvion, F., *Les techniques de l'éléctrification feroviaire,* École supérieure d'électricite, Paris, 1964.
5. Negrea, Fl., *Frînarea electrică.* M.C.F. Centrul de documentare și publicații tehnice, București, 1969.
6. *** *Locomotiva electrică 060—EA* (vol. I, II, III, IV). M.C.F. — Centrul de documentare și publicații tehnice, București, 1966.
7. * * * *Locomotiva electrică 040—EC.* M.T.Tc. — I.P.C.F., București, 1972.
8. Garreau, M., *Cours de traction électrique,* Editions scientifique Riber. Paris, 1960.
9. Thimenev, N. B., *Elektrovozî peremennogotoka so staticeskimi preobrazovateliami,* Ed. Transjeldorizdat, Moskva, 1958.
10. Nouvin, F., Cossié, A., Dupout, R., *Les locomotives monophasées BB 15000.* Revue générale des chemins de fer, Nr. 6/1971.
11. Chauprade, R., Tournois, G., *Les locomotives de la série BB 15 000.* Revue Jeumont — Schneider nr. 14/1972.
12. Cossié, A., *Le hacheur en traction électrique a courant continuu,* Revue générale des chemins de fer Nr. 1/1973.
13. Leroy, J., Guibereau, S., *Expérimentations d'équipements a hacheurs (Késar) pour le contrôle des moteurs de traction du métropolitain de Paris,* Revue générale des chemins de fer Nr. 1/1973.
14. Baltag, Th., Ciortan, P., Banu, C., *Optimizarea dimensionării instalației de redresare de pe locomotiva electrică 060 EA,* Revista Electrotehnica nr. 5/1971.
15. Meyer, K., *Die Prototyplokomotiven der Serie Re 6/6 der Schweizerischen Bundesbahnen* Schweizerische Bauzeitung Nr. 48/1972.



**Plan editură Nr. 5817**
**Coli de tipar 27,50**
**Bun de tipar 7.05.80**

C. 326 — I. P. INFORMAȚIA
str. Brezoianu nr. 23—25,
București